

工學碩士 學位論文

녹산국가산업단지 인근에서 해안방재를 위한
해안환경요소의 평가

**Valuation of Coastal Environment Factor for Coastal
Disaster Prevention around Noksan Industrial Complex**

指導教授 金 度 三

2007年 2月

韓國海洋大學校 海事産業大學院

土木環境工學科

裴 永 宗

Valuation of Coastal Environment Factor for Coastal Disaster Prevention around Noksan Industrial Complex

by

Yeong Jong Bae

*Department of Civil and Environment System Engineering
Graduate School of Maritime Industrial Studies
Korea Maritime University*

ABSTRACT

In general, the coastal damage is mostly occurred by the action of complex factor like severe water waves due to variation of long period sea level such as tide, storm surge and tsunami. Among them, if the maximum storm surge height combine with high tide, severe water wave will be overflow coastal structure such as seawall, dike and revetment. Consequently, it can be cause of many life loss and badly property damage in the inland. Therefore, in order to prevent/reduce recurrence of the disaster like inundation, it is very important to investigate highly prediction and the fluctuation characteristics of the storm surge height, related to the local peculiarities at each coastal area where occurrence of the inundation is expected. In addition, in case of plan for hazard map in the coastal zone, highly forecasting of inundation regime due to the coastal flood of severe water wave is very important factor. In this

study, using the numerical model, the storm surge was simulated to examine its fluctuation characteristics at the coast in front of Noksan industrial complex, Korea. Typhoon of Sarah(5914), Thelma(8705) and Maemi(0314), which caused terrible damage to the coastal area along the coast of Busan in the past, was used for storm surge simulation. The shallow water wave at the coast in front of Noksan industrial complex is calculated by applying typhoon Maemi's wind field, design water level considering storm surge height for typhoon Maemi to SWAN model. Under the condition of shallow water wave obtained by SWAN model, wave overtopping rate for dike in front of Noksan industrial complex is estimated by applying to VOF method, which can simulate the nonlinear wave including the wave overtopping process with acceptable accuracy. Finally, applying estimated wave overtopping rate to Noksan industrial complex, inundation regime was predicted. And, numerically predicted inundation regimes and depths are compared with results in on-the-spot survey, and the results agree fairly well. Therefore, newly proposed method in this study is useful tool for predicting inundation regime due to the coastal flood of severe water wave.

녹산국가산업단지 인근에서 해안방재를 위한 해안환경요소의 평가

裴 永 宗

韓國海洋大學校 海事産業大學院
土木環境工學科

요 약

삼면이 바다로 둘러싸여 해안지역의 비율이 높으며, 국토가 좁고 인구가 많은 우리 나라와 같은 환경에서는 연안매립으로 대표되는 해안지역개발이 필수적이지만, 부지조성비의 저감을 위해 대부분이 낮은 지반고와 천단고로 조성됨에 따라 폭풍시에 해안범람이 빈번하게 발생하고 이로 인한 피해도 엄청나다. 해안범람은 조석, 폭풍해일, 지진해일 등의 장주기 해수위 변동과 그로 인한 고파랑 등의 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 발생한다. 이 중에서 조석과 같이 항상 존재하는 경우에는 설계에 충분히 반영될 수 있어 큰 문제를 야기시키지는 않지만, 폭풍해일의 경우에는 이상파랑시에 발생하고 특히, 최대폭풍해일고가 만조와 중첩되는 경우는 호안을 비롯한 해안구조물을 월류하여 해안가 저지대 등의 제내지에서 많은 인명손실과 막대한 재산피해를 야기시킬 수 있다. 이와 같은 폭풍해일고의 지역적인 분포특성은 지역내에서 연안방재계획의 수립 및 연안재해예보에 주요한 요소이므로 조속히 검토되어야 할 과제이다. 그러므로, 제내지내의 범람구역의 정확한 추정 및 이를 통한 적절한 경보나 대책방안의 확립이 절실히 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 2003년 태풍 Maemi(0314)에 의해 극심한 피해를 입었던 녹산국가산업단지를 대상으로 태풍 Sarah(5914), Thelma(8705) 및 Maemi(0314)내 습시의 폭풍해일고 검토를 위한 수치시물레이션을 실시하였다. 그리고, 대상영역에 가장 높은 폭풍해일고가 산정된 태풍 Maemi(0314)에 대해 바람장을 추정하고, 그 결과를 SWAN모델에 적용하여 녹산국가산업단지 주변해역에서 천해파랑의 특성을 검토하였다. 또한, 설계조위와 신심해설계파를 고려하여 산정된 천해파랑에 대해 VOF법으로 월파랑을 산정함으로써 고파랑과 폭풍해일의 결합에 의한 제내지의 침수현상을 검토할 수 있는 수치해석수법을 기술하였다. 그리고, 이를 녹산국가산업단지 지역에 적용하여 도로와 건물의 복잡한 배치에 따른 침수의 경향을 예측하고 제내지의 범람특성을 규명하고자 하였으며, 대상지역 배후의 범람을 예측하고 현지결과와 비교하여 그의 타당성을 확인하였다.

目 次

| | |
|-----------------------|-------|
| ABSTRACT | i |
| 요약 | iii |
| 目次 | v |
| LIST OF FIGURES | viii |
| LIST OF TABLES | xi |
| LIST OF SYMBOLS | xiii |
| 제1장 서론 | 1 |
| 1.1 연구의 배경과 목적 | 1 |
| 1.2 연구의 구성 | 3 |
| 제2장 이론적 배경 | 4 |
| 2.1 폭풍해일모델 | 4 |
| 2.1.1 개요 | 4 |
| 2.1.2 기초방정식 | 4 |
| 2.2 SWAN모델 | 7 |
| 2.2.1 개요 | 7 |
| 2.2.2 기초방정식 | 7 |
| 2.3 VOF법 | 9 |
| 2.3.1 개요 | 9 |
| 2.3.2 기초방정식 | 9 |
| 2.3.3 이류방정식 | 11 |
| 2.4 침수범람모델 | 13 |
| 2.4.1 개요 | 13 |
| 2.4.2 기초방정식 | 13 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 제3장 수치해석결과 | 16 |
| 3.1 폭풍해일 | 16 |
| 3.1.1 태풍경로 및 조건 | 16 |
| 3.1.2 대상영역 | 20 |
| 3.1.3 수치계산의 검증 | 26 |
| (1) 기압 | 26 |
| (2) 폭풍해일고 | 28 |
| 3.1.4 최대폭풍해일고 | 30 |
| (1) 태풍 Sarah 내습시의 최대폭풍해일고 | 30 |
| (2) 태풍 Thelma 내습시의 최대폭풍해일고 | 30 |
| (3) 태풍 Maemi 내습시의 최대폭풍해일고 | 30 |
| 3.2 SWAN모델에 의한 천해파랑 | 35 |
| 3.2.1 대상영역 및 조건 | 35 |
| 3.2.2 수치해석결과 | 39 |
| (1) 신행 완공전 | 39 |
| (2) 신행 완공후 | 42 |
| 3.3.3 설계조위결정 | 45 |
| 3.3 월파유량의 추정 및 범람해석 | 46 |
| 3.3.1 원안의 대표호안단면에서 월파유량의 추정 | 46 |
| (1) 원안의 대표호안단면 | 46 |
| (2) 원안의 대표호안단면에서 월파재현 | 48 |
| (3) 원안의 대표호안단면에서 월파랑 | 52 |
| 3.3.2 대안의 대표호안단면에서 월파유량의 추정 | 53 |
| (1) 대안의 대표호안단면 | 53 |
| (2) 대안의 대표호안단면에서 월파재현 | 55 |
| (3) 대안의 대표호안단면에서 월파랑 | 63 |
| 3.3.3 범람예측 | 64 |
| (1) 월파유량의 변화에 따른 침수고의 변화 | 64 |
| (2) 단면의 변화에 따른 침수고의 변화 | 67 |

| | |
|---------------------------|----|
| 제4장 결 론 | 70 |
| 4.1 폭풍해일 | 70 |
| 4.2 SWAN모델 | 71 |
| 4.3 월파유량의 추정 및 범람해석 | 71 |
| <참고문헌> | 73 |

LIST OF FIGURES

| | |
|--|----|
| Fig. 2.1 Sketch of numerical wave channel | 9 |
| Fig. 2.2 Concept of flood flow head | 15 |
| Fig. 3.1 Route of typhoon Sarah | 17 |
| Fig. 3.2 Route of typhoon Thelma | 17 |
| Fig. 3.3 Route of typhoon Maemi | 18 |
| Fig. 3.4 Route of typhoons used in numerical simulation | 18 |
| Fig. 3.5 Calculating areas of storm surge simulation | 21 |
| Fig. 3.6 Spatial distributions of water depth in each area | 25 |
| Fig. 3.7 Comparison of atmospheric pressure between measured and calculated results for typhoon Maemi | 27 |
| Fig. 3.8 Comparison of storm surge height between measured and calculated results for typhoon Maemi | 29 |
| Fig. 3.9 Spatial distributions of maximum storm surge height for typhoon Sarah | 31 |
| Fig. 3.10 Spatial distributions of maximum storm surge height for typhoon Thelma | 32 |

| | |
|--|----|
| Fig. 3.11 Spatial distributions of maximum storm surge height for typhoon Maemi | 33 |
| Fig. 3.12 Computation areas of SWAN simulation | 36 |
| Fig. 3.13 Spatial distributions of water depth | 37 |
| Fig. 3.14 Spatial distribution of wave height before construction of Busan new port | 41 |
| Fig. 3.15 Spatial distribution of wave-setup before construction of Busan new port | 41 |
| Fig. 3.16 Spatial distributions of wave height after construction of Busan new port | 44 |
| Fig. 3.17 Spatial distribution of wave-setup after construction of Busan new port | 44 |
| Fig. 3.18 Representation section of original seawall used in numeric simulation | 47 |
| Fig. 3.19 Snapshots of wave overtopping for cross section Type-A | 49 |
| Fig. 3.20 Snapshots of wave overtopping for cross section Type-B | 50 |
| Fig. 3.21 Snapshots of wave overtopping for cross section Type-C | 51 |
| Fig. 3.22 Sections of alternative seawall used in numeric simulation | 54 |
| Fig. 3.23 Snapshots of overtopping process for each alternative section | 62 |

| | |
|--|----|
| Fig. 3.24 Spatial distributions of inundation depth in Noksan industrial complex | 65 |
| Fig. 3.25 A survey of inundation areas and depths in Noksan industrial complex | 66 |
| Fig. 3.26 Spatial distributions of inundation depth for section of alternative seawall in Noksan industrial complex | 69 |

LIST OF TABLES

| | |
|--|----|
| Table 3.1 Characteristics of typhoon Sarah | 19 |
| Table 3.2 Characteristics of typhoon Thelma | 19 |
| Table 3.3 Characteristics of typhoon Maemi | 20 |
| Table 3.4 Mesh sizes applied to each area | 21 |
| Table 3.5 Maximum storm surge heights in cases of typhoon Sarah, Thelma and Maemi | 34 |
| Table 3.6 Mesh sizes applied to each simulating area | 35 |
| Table 3.7 Design water levels for typhoon Maemi | 38 |
| Table 3.8 Deepwater design waves for Noksan coast | 38 |
| Table 3.9 Reflection coefficients | 38 |
| Table 3.10 The last design water level considered wave-setup | 45 |
| Table 3.11 Incident wave conditions | 48 |
| Table 3.12 Overtopping rates calculated by numeric analysis | 52 |
| Table 3.13 Overtopping rates by hydraulic model test | 52 |
| Table 3.14 Incident wave condition | 55 |

| | |
|---|----|
| Table 3.15 Calculated overtopping rates for each alternative section | 63 |
| Table 3.16 Overtopping rates obtained by numerical and experimental results | 64 |
| Table 3.17 Comparison of inundation heights between numeric and experimental | 66 |
| Table 3.18 Comparison of overtopping rates..... | 67 |

LIST OF SYMBOLS

| | |
|---------------------|---------------------|
| A_h | 수평 와동점성계수 |
| C_D | 항력계수 |
| C_X | X 방향의 전파속도(군속도) |
| C_Y | Y 방향의 전파속도(군속도) |
| C_σ | σ 공간에서의 전파속도 |
| C_Θ | Θ 공간에서의 전파속도 |
| D | 전수심 ($h+n$) |
| D_x | x 방향의 파랑에너지감쇠계수 |
| D_z | z 방향의 파랑에너지감쇠계수 |
| $E(\sigma, \Theta)$ | 에너지 밀도 스펙트럼 |
| n | 폭풍해일에 의한 수면변위 |
| F | VOF함수 |
| f | coriolis 계수 |
| g | 중력가속도 |
| γ_v | 체적공극률 |
| γ_x | x 방향의 면적공극률 |
| γ_z | z 방향의 면적공극률 |
| H | 수위 |
| h_h | 단락시의 수심 |
| h_l | 월류시의 수심 |
| h | 수심 |
| M | x 방향의 유량 |

| | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| M_0 | 월류 유량 |
| N | y 방향의 유량 |
| $\mathcal{M}(\sigma, \Theta)$ | action 밀도 스펙트럼 |
| n_n | manning의 조도계수 |
| v_ε | 분자동점성계수와 와동점성계수의 합 |
| Δp | 기압심도 |
| p_c | 태풍의 중심기압 |
| p_r | 태풍의 중심으로부터 r 만큼 떨어진 점에서의 기압 |
| p_0 | 수면에서의 기압 |
| q^* | 조파위치 $x = x_s$ 에서의 조파소스의 유량밀도 |
| ρ_a | 대기의 밀도 |
| ρ_w | 해수의 밀도 |
| r | 등압선의 곡률반경 |
| r_0 | 태풍반경 |
| S | 파랑스펙트럼을 구성하는 성분파 |
| S_F | 조파소스항 |
| S_p | 조파소스항 |
| S_u | 조파소스항 |
| S_w | 조파소스항 |
| S_{in} | 바람에 의한 파랑으로의 에너지유입 |
| S_{ds} | 쇄파와 저면마찰 및 백파 등에 의한 에너지소산항 |
| S_{nl} | 비선형상호작용에 의한 스펙트럼 성분간의 에너지전달 |
| σ | 각주파수 |
| t | 시간 |
| τ_{bx} | 해저에서 x 방향으로 전단력 |

| | |
|-------------|--------------------------|
| τ_{by} | 해저에서 y 방향으로 전단력 |
| τ_{sx} | 해면에서 x 방향으로 전단력 |
| τ_{sy} | 해면에서 y 방향으로 전단력 |
| $U(x, z)$ | 조파소스의 유속 |
| U | x 방향의 해저에서 해면까지 평균유속성분 |
| U_{10} | 해면상 10m에서의 풍속 |
| U_x | 해면 10m에서 x 방향으로 풍속 |
| U_y | 해면 10m에서 y 방향으로 풍속 |
| u | x 방향의 유속성분 |
| V | y 방향의 해저에서 해면까지 평균유속성분 |
| v | y 방향의 유속성분 |
| Δx | 수평방향의 격자간격 |
| z | 지반고 |
| Δz | 연직방향의 격자간격 |

제1장 서론

1.1 연구의 배경과 목적

삼면이 바다로 둘러싸여 해안지역의 비율이 높으며, 국토가 좁고 인구가 많은 우리나라와 같은 환경에서는 연안매립으로 대표되는 해안지역개발이 필수적이지만, 높은 부지조성비의 관계로 대부분이 낮은 지반고와 천단고로 조성됨에 따라 폭풍시에 해안범람이 빈번하게 발생하고 이로 인한 피해도 엄청나다. 우리나라 남해안의 연안역은 태풍의 진로상에 위치되어 거의 매년 태풍으로 인한 막대한 연안재해를 입어왔으며, 1959년도의 14호 태풍 Sarah, 1987년도의 5호 태풍 Thelma 및 2003년도의 14호 태풍 Maemi는 연안역에 엄청난 물적 및 인적피해를 초래한 대표적인 태풍이다. 최근에, 지구온난화 및 변화된 해양환경의 영향으로 고파랑을 동반한 태풍 및 폭풍해일로 인하여 연안재해가 빈번히 발생되고 있으며, 특히 지구온난화 등에 의한 해수온도의 상승으로 향후 발생빈도가 더욱 증가할 것으로 예측되며, 더불어 재해규모도 증대될 것으로 예상되고 있다.

태풍에 의한 피해는 일반적으로 강풍에 의한 구조물 등의 붕괴, 폭우와 더불어 발생하는 폭풍해일에 의한 해수면상승으로 인한 침수피해가 큰 요인이다. 해안범람은 조석, 폭풍해일, 지진해일 등의 장주기 해수위 변동과 그로 인한 고파랑 등의 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 발생한다. 이 중에서 조석과 같이 항상 존재하는 경우에는 설계에 충분히 반영될 수 있어 큰 문제를 야기시키지는 않지만, 폭풍해일의 경우에는 이상파랑시에 발생하고 특히, 최대폭풍해일고가 만조와 중첩되는 경우는 호안을 비롯한 해안구조물을 월류하여 해안가 저지대 등의 제내지에서 많은 인명손실과 막대한 재산피해를 야기시킬 수 있다.

이와 같이 연안역에서 연안재해의 주요한 인자인 폭풍해일의 위험성에 대한 인식이 비교적 높아지고 있고, 폭풍해일에 관한 연구도 최근 2003년도의 14호 태풍 Maemi에 의한 엄청난 재해를 입은 후로 강(2004), 김 등(2004), 최(2004), 최 등(2004), 강 등(2004), 강(2005), Kawai et al.(2005a, b) 및 허 등(2006a, b)에 의해 다소간 수행되었다. 이와 같은 과거의 대형태풍을 포함한 폭풍해일고의 지역적인 분포특성은 지역내에서 연안방재계획의 수립 및 연안재해예보에 주요한 요소이므로 조속히 검토되어야 할 과제이다. 따라서, 제내지내의 범람구역의 정확한 추정 및 이를 통한 적절한 경보나 대책방안의 확

립이 절실히 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 폭풍해일의 피해에 가장 많이 노출되어 있는 부산연안역 가운데 태풍 Maemi에 의해 극심한 피해를 입었던 녹산국가산업단지를 대상으로 폭풍해일고의 검토를 위한 수치시뮬레이션을 실시하였다. 먼저 2003년 9월 12일 경남 사천에 상륙하여 경남 및 부산연안역에 막대한 피해를 입혔고, 과거 태풍중에 태풍규모와 재해규모의 양측면에서 각종 기록을 경신한 14호 태풍 Maemi를 대상으로 폭풍해일고를 산정하였다. 다음으로, 과거의 기록에서 부산을 포함한 우리나라 남해안의 동부연안에 큰 피해를 발생시킨 1959년 14호 태풍 Sarah와 1987년 5호 태풍 Thelma 상륙시의 부산연안역의 폭풍해일고를 산정하였다.

그리고, 대상영역에 가장 높은 폭풍해일고가 산정된 2003년도 14호 태풍 Maemi에 대해 바람장을 추정하고, 그 결과를 SWAN모델에 적용하여 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지 주변해역에서 천해파랑의 특성을 검토하였다.

또한, 설계조위(약최고고조위+조위편차+wave-setup)와 신심해설계파를 고려하여 산정된 천해파랑에 대해 VOF법으로 월파랑을 산정함으로써 고파랑과 폭풍해일의 결합에 의한 제내지의 침수현상을 검토할 수 있는 수치해석수법을 기술하였다. 그리고, 이를 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지 지역에 적용하여 도로와 건물의 복잡한 배치에 따른 침수의 경향을 예측하고 제내지의 범람특성을 규명하고자 하였으며, 대상지역 배후의 범람을 예측하고 현지결과와 비교하여 그의 타당성을 확인하였다.

1.2 연구의 구성

본 연구는 총 4장으로 구성되며 다음과 같다.

제1장에서는 본 연구의 배경과 목적에 대해서 서술하고, 다음으로 본 연구의 구성에 대해 간단히 기술한다.

제2장에서는 수치해석을 위하여 본 연구에서 제안하는 폭풍해일모델, SWAN모델, VOF 및 범람해석모델의 기초방정식과 경계조건에 대한 이론을 전개하고, 수치해석을 수행함에 있어 필요한 전반적인 사항을 기술한다.

제3장에서는 본 연구에서 제안한 모델에 대한 수치해석을 수행하고 폭풍해일모델의 타당성, 대상지역에서 폭풍해일고, 천해설계파, 월파유량 및 범람해석결과를 제시한다.

제4장에서는 이상으로부터 도출된 중요한 사항을 요약하여 본 연구의 결론으로 한다. 마지막으로 본 연구에 있어서 참고하고 인용한 주요한 문헌을 제시한다.

제2장 이론적 배경

2.1 폭풍해일모델

2.1.1 개 요

태양과 달의 인력에 의해 해수면이 규칙적으로 변동하는 성분을 천문조라고 하며, 천문조의 높은 피크를 만조(고조), 낮은 피크를 간조(저조)라고 한다. 만조와 간조의 차이인 조위차(조차)가 크게 되는 시기를 대조, 적게 되는 시기를 소조라고 하며, 모두 약 반개월의 주기로 나타난다. 달과 태양은 규칙적으로 운동하기 때문에 장기간에 걸쳐서 조위관측을 수행하면 과거 및 앞으로의 임의시각에 있어서 천문조위를 정확히 추정할 수 있다.

그러나, 태풍이나 저기압이 접근하여 기압이 저하되고 강풍이 불면 실제의 조위는 천문조보다 높아지게 된다. 또한, 해류의 유로가 변화하는 경우에도 수주에서 수개월에 걸쳐 조위가 변화하는 경우도 있다. 이와 같은 조위변화는 달이나 태양 등의 천체운동과는 직접적인 관계는 없고, 지구상의 여러 기상적인 요인에 의해 발생하기 때문에 기상조라고 불린다. 그리고, 이 기상조의 진폭(천문조로부터 높이)을 폭풍해일고 혹은 조위편차라고 부른다.

폭풍해일은 주로 태풍의 중심부근에서는 그 주변과 비교하여 기압이 낮고 해면을 누르는 힘이 약하기 때문에 해면이 높아지게 되는 저기압에 의한 수위상승(pressure setup)과 바람이 바다에서 육지로 향하여 불면 해면에 발생하는 마찰력에 의해 해수는 육지측으로 운반되고 이것이 축적되어 해면이 높아지게 되는 바람에 의한 수위상승(wind setup) 및 고파랑의 쇄파에 의한 수위상승(wave setup)의 3성분으로 구성된다.

2.1.2 기초방정식

본 연구의 폭풍해일고 추산에 적용되는 기초방정식은 연직방향으로 적분된 다음의 연속방정식(2.1)과 비선형장파방정식(2.2), (2.3)으로 구성된다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \{ (\eta + \eta) U \}}{\partial x} + \frac{\partial \{ (\eta + \eta) V \}}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \quad (2.2)$$

$$= fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \quad (2.3)$$

$$= -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} + A_v \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right)$$

여기서, x, y 는 수평방향으로 각각 취한 좌표계이고, f 는 Coriolis계수, h 는 수심, D 는 기본수심 h 와 폭풍해일에 의한 수면변위 η 를 합한 전수심, $M = UD$, $N = VD$, U, V 는 x, y 방향의 평균유속, ρ_w 는 해수의 밀도, p_0 는 수면에서의 기압, A_h 와 A_v 는 수평 및 연직와동점성계수, g 는 중력가속도, η 는 폭풍해일에 의한 수면변위이다.

그리고, τ_{sx} 와 τ_{sy} 및 τ_{bx} 와 τ_{by} 는 해면 및 해저에서 x, y 방향으로 각각의 전단력이다.

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D U_x \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (2.4)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_D U_y \sqrt{U_x^2 + U_y^2} \quad (2.5)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.6)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_a g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.7)$$

여기서, ρ_a 는 대기의 밀도, U_x 와 U_y 는 해면상 10m에서 각각 x , y 방향으로 풍속, n 은 Manning의 조도계수, C_D 는 해면저항계수(항력계수)이다.

항력계수에 대해서는 모형실험이나 현지관측에 기초한 많은 경험값이 제안되어 있지만, 본 연구에서는 다음의 Mitsuyasu and Kusaba(1984)에 의한 제안식을 사용하였다.

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024 U_{10})/10^{-3} & (U_{10} < 8 \text{ m/s}) \\ (0.581 + 0.063 U_{10})/10^{-3} & (U_{10} \geq 8 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (2.8)$$

여기서, U_{10} 은 해면상 10m에서 풍속이다.

2.2 SWAN모델

2.2.1 개 요

SWAN(Simulation WAve Nearshore)에서 고려할 수 있는 전파과정은 지리적 공간좌표상에서의 이류, 수심과 흐름의 공간변화에 의한 굴절, 수심과 흐름의 공간변화에 의한 천수, 역류에 의한 파랑의 반사 및 차단, 구조물(장애물)에 의한 파랑의 반사, 차단 및 전달, Phase-decoupled approach를 이용한 회절, 파랑에 의한 평균수위변동(wave-induced set-up)이 있다. 그리고, 바람에 의한 파랑에너지의 생성, 백파(whitcapping), 쇄파(depth-induced wave breaking), 저면마찰(bottom friction)에 의한 파랑에너지의 소산, 비선형상호작용에 의한 파랑간의 에너지전달 등의 파랑에너지의 생성, 소산 등을 고려할 수 있다.

2.2.2 기초방정식

SWAN모형에서 파랑은 쇄파대에서와 같이 비선형성이 큰 조건에서도 파랑의 스펙트럼 분포를 고정도로 예측할 수 있는 2차원 wave action density spectrum으로 표현된다. SWAN에서 고려되는 action density spectrum $\mathcal{N}(\sigma, \Theta)$ (σ 와 Θ 는 각각 상대주파수와 파향)은, 흐름이 존재할 때 파동(action density)은 보존되는 반면에 에너지(energy density)는 보존되지 않기 때문에, energy density spectrum $\mathcal{E}(\sigma, \Theta)$ 보다 일반화 된 물리량이다. $\mathcal{N}(\sigma, \Theta)$ 는 $\mathcal{E}(\sigma, \Theta)$ 를 상대주파수 σ 로 나눈 값과 동일하다.

SWAN에서 파랑스펙트럼에 관한 기초방정식은 다음과 같이 주어진다(Hasselmann et al., 1973).

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathcal{N} + \frac{\partial}{\partial X} C_X \mathcal{N} + \frac{\partial}{\partial Y} C_Y \mathcal{N} + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma \mathcal{N} + \frac{\partial}{\partial \Theta} C_\Theta \mathcal{N} = \frac{S}{\sigma} \quad (2.9)$$

여기서, 좌변의 첫 번째 항은 파동의 국소적인 시간변화를 나타내며, 두 번째와 세 번째 항은 파동의 이류항을 나타낸다. 네 번째 항은 수심과 흐름의 변화에 의해 발생하는

상대주파수의 변화를 나타내고, 다섯 번째 항은 수심과 흐름으로 인한 굴절에 의한 변화를 나타낸다. 그리고, C_X, C_Y 는 각각 X, Y 방향의 전파속도(군속도)를, C_σ 와 C_θ 는 σ 와 θ 공간에서의 전파속도를 각각 나타낸다. 우변의 항 $S=(S(\sigma, \theta))$ 는 식(2.10)와 같이 파랑스펙트럼을 구성하는 성분파로의 에너지 입·출력을 표현한 것으로, 파랑의 생성, 소산 및 성분파간의 비선형 상호작용에 의한 에너지전달을 포함한다.

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2.10)$$

여기서, S_{in} 은 바람에 의한 파랑으로의 에너지유입을 나타내며, S_{ds} 는 쇄파와 저면마찰 및 백파 등에 의한 에너지소산항을, S_{nl} 은 비선형상호작용에 의한 스펙트럼 성분간의 에너지전달을 나타내고 있다.

2.3 VOF법

2.3.1 개요

최근, 자유수면을 갖는 비압축성 유체의 해석을 위해 Hirt and Nichols(1981)가 제안한 VOF법이 자유수면을 취급하는 많은 학문분야에서 활발히 활용되고 있다. 특히, 일본에서는 잠제에 의한 쇄파해석에 岩田 등(1994)이 처음으로 VOF법을 적용하였고, 유럽에서는 Petit et al.(1994), Van Gent et al.(1994) 등에 의해 VOF법의 유효성이 보고되고 있으며, 그 이후, 許(2000)는 3차원 구조물에 대한 파력해석에까지 VOF법을 확장시켰다. 또한, 많은 일본 연구자에 의한 공동연구의 결과로 개발된 CADMAS-SURF(沿岸開發技術研究Center, 2001)는 사용자가 직접 입·출력을 제어할 수 있는 효과적인 2차원 파동장의 해석프로그램으로 알려져 있다. 국내에서는 김 등(2001, 2002)이 최초로 VOF-SOLA법을 이용한 수치파동수로를 제안하고 잠제주변의 파동장해석을 수행하였다.

CADMAS-SURF에서 적용하고 있는 Fig. 2.1의 수치파동수로는 2차원 수치파동수로 내에 파의 재반사를 방지하기 위한 개경계처리기법으로 해석영역 양쪽에 에너지감쇠영역을 두고 있고, 조파를 위해 조파소스를 적용하고 있다.

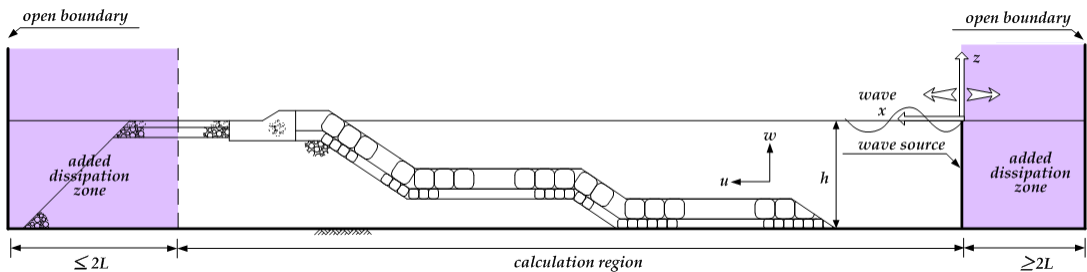


Fig. 2.1 Sketch of numerical wave channel.

2.3.2 기초방정식

유체를 2차원 비압축성의 점성유체로 가정하면 기초방정식은 연속방정식(2.11)와 porous로 확장한 Navier-Stokes의 운동방정식(2.12), (2.13)으로 구성된다.

$$\frac{\partial \mathbb{Y}_x \mathcal{U}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbb{Y}_z \mathcal{W}}{\partial z} = S_p \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial \mathcal{U}}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x \mathcal{U}}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z \mathcal{W}}{\partial z} = & - \frac{\mathbb{Y}_v}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mathbb{Y}_x \mathbb{V} \left(2 \frac{\partial \mathcal{U}}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mathbb{Y}_z \mathbb{V} \left(\frac{\partial \mathcal{U}}{\partial z} + \frac{\partial \mathcal{W}}{\partial z} \right) \right\} - D_x \mathcal{U} + S_u - R_x \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial \mathcal{W}}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x \mathcal{U}}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z \mathcal{W}}{\partial z} = & - \frac{\mathbb{Y}_v}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mathbb{Y}_x \mathbb{V} \left(\frac{\partial \mathcal{W}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{U}}{\partial z} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mathbb{Y}_z \mathbb{V} \left(2 \frac{\partial \mathcal{W}}{\partial z} \right) \right\} - D_z \mathcal{W} + S_w - R_z - \mathbb{Y}_v \mathcal{G} \end{aligned} \quad (2.13)$$

여기서, \mathbb{V}_v 는 분자동점성계수와 외동점성계수의 합, \mathbb{Y}_v 는 체적공극률, $\mathbb{Y}_x, \mathbb{Y}_z$ 는 각각 x, z 방향의 면적공극률을 나타낸다. 또한, $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ 는 관성력계수 C_M 을 사용하면 식(2.14)~(2.16)과 같이 주어진다.

$$\lambda_v = \mathbb{Y}_v + (1 - \mathbb{Y}_v) C_M \quad (2.14)$$

$$\lambda_x = \mathbb{Y}_x + (1 - \mathbb{Y}_x) C_M \quad (2.15)$$

$$\lambda_z = \mathbb{Y}_z + (1 - \mathbb{Y}_z) C_M \quad (2.16)$$

그리고, D_x, D_z 는 부가감쇠영역을 제외하고는 0으로 주어지는 x, z 방향에 대한 파랑에너지감쇠계수이다. S_p, S_u, S_w 는 조파소스항으로 다음의 식과 같이 정의된다.

$$S_p = \mathcal{A}(z, \hbar) \quad (2.17)$$

$$S_u = uq(z, t) \quad (2.18)$$

$$S_w = wq(z, t) + \frac{v}{3} \frac{\partial q(z, t)}{\partial z} \quad (2.19)$$

여기서, $q(z, t)$ 는 $x = x_s$ 의 위치에서 격자간격을 Δx_s 로 두면 다음의 식(2.20)과 같이 주어진다.

$$q(z, t) = 2 \frac{U(x, t)}{\Delta x_s} \quad (2.20)$$

여기서, $U(x, t)$ 는 조파소스의 유속이다. 또한, 항력항 R_x , R_z 를 항력계수 C_D 를 적용하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) \rho \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.21)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) \rho \sqrt{u^2 + w^2} \quad (2.22)$$

여기서, Δx , Δz 는 수평, 연직방향의 격자간격이다.

2.3.3 이류방정식

VOF함수 F 는 일정 물리량인 유체의 체적율로서 $0 \leq F \leq 1$ 의 범위를 가진다. 여기서, $F = 1$ 일 경우는 유체셀로, $F = 0$ 일 경우는 기체셀로, $0 < F < 1$ 일 경우는 표면셀로 각각 판단하여 자유수면을 추적하게 되며, 다음의 이류방정식(2.23)에 의해 VOF함수가 이류된다.

$$\mathbb{Y}_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \mathbb{Y}_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \mathbb{Y}_z w F}{\partial z} = S_F \quad (2.23)$$

여기서, $S_F = Fq(z, t)$ 는 조파소스를 위한 소스항이다.

2.4 침수범람모델

2.4.1 개요

범람류 해석을 위해 McDonald and Ledger(1981)는 대상영역이 산지나 제방 등으로 둘러싸인 폐쇄적인 지형인 경우에 수위와 유량의 관계로부터 연속방정식만을 적용하여 범람역을 구하는 방법을 제안하였다. 하지만, 이 방법은 적용가능한 영역이 제한적이고 얻을 수 있는 결과도 매우 부족한 단점이 있다. 범람해석을 행하는 대부분의 영역이 평면적이므로 2차원 홍수범람류해석이 요구되고 있다. Xanthopoulos and Koutitas(1976)은 범람류의 거동에 천수방정식을 적용하여 유한차분법으로 해석하였으며, Miura and Shimizu(1993)은 건물이나 도로가 복잡하게 배치되어 있는 도시역에 적용하여 범람류를 계산하였다. 武田(1996)은 임해해역에서의 고조범람해석을 수치해석을 통해 해석하였으며, 도심부의 건물 등과 같은 구조물이 존재하는 경우에 계산격자내 건물이 차지하는 점유율의 개념을 도입하여 수치계산을 수행하였다. 또한, Takeda et al.(2005)은 유한체적법의 개념을 도입한 비구조격자를 이용하여 폭풍해일 등에 의한 연안역에서의 범람을 도로를 통한 홍수전파의 특성으로 재현하여 해석하였다. 본 연구에서는 직각좌표계 장방형격자 범람해석법을 사용하여 연안역에서의 폭풍해일에 의한 홍수범람류의 전파특성을 유한차분법으로 해석한다.

2.4.2 기초방정식

평면2차원 범람모델의 기초방정식은 연속방정식(2.24)와 운동방정식(2.25), (2.26)으로 구성된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} \quad (2.26)$$

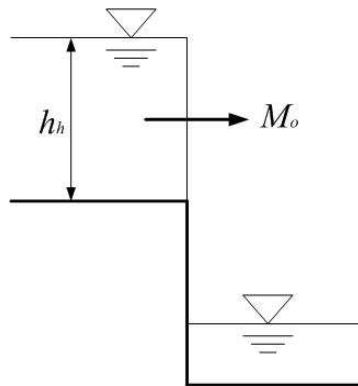
여기서, $M=uh$, $N=vh$, ρ_w 는 해수의 밀도, τ_{bx} 와 τ_{by} 는 해저에서 x , y 방향으로 각각의 전단력이며, H 는 수위 ($H=h+z$, z 는 지반고)이다.

그리고, 범람을 해석하는 경우 수위가 0인 상태의 격자에 범람수가 전파하는 범람수 선단부의 취급이 문제가 된다. 본 연구에서는 선단부를 포함하여 범람수가 불연속이 되는 경우에 Fig. 2.2에 나타난 지반고와 수위의 관계에 따라 단락식이나 월류식을 각각 적용하였다. 즉, 인접한 지역에 비해 지반고가 높은 경우(Fig. 2.2(a))에 식(2.27)의 단락식을, 인접한 지역에 비해 지반고가 낮은 경우(Fig. 2.2(b))에 대해서는 식(2.28)의 월류식을 각각 적용하여 유량을 산정한다.

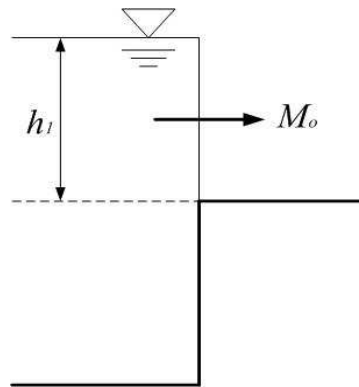
$$M_o = \mu h_h \sqrt{gh_h} \quad (2.27)$$

$$M_o = \mu' h \sqrt{2gh_l} \quad (2.28)$$

여기서, M_o 는 월류유량, $\mu = (2/3)^{3/2} = 0.544$, $\mu' = 0.35$ 이며(井上, 1986), h_h 는 단락시의 수심, h_l 은 월류시의 수심을 나타낸다.



(a) Case of down-stream



(b) Case of up-stream

Fig. 2.2 Concept of flood flow head.

침수역(침수되는 영역)과 지반역(침수되지 않는 영역)의 경계는 수심의 최소치 $\varepsilon = 0.001m$ 에 의해 결정되는 것으로 하였으며, 이 때 ε 이하의 지역에 대해서는 지반역, ε 이상의 지역에 대해서는 침수역으로 표현된다. 지형정보(지반고)를 파악하여 침수역인지 아닌지를 판단한다. 또한, 침수역이 지반역으로 변하는 경우에 발생할 수 있는 (-)수심에 대해서는 수심을 영(零)으로 하였다.

제3장 수치해석결과

3.1 폭풍해일

3.1.1 태풍경로 및 조건

Fig. 3.1~3.3은 본 연구에서 대상으로 하는 태풍 Sarah(5914)와 Thelma(8705) 및 Maemi(0314)의 진행경로를 나타내며, 그림으로부터 3개의 태풍은 남부연안을 통과하는 대표적인 정상진행경로라는 것을 알 수 있다. 태풍 Sarah(5914)는 한반도로 직접 상륙하지 않고 부산 앞바다를 통과하였으나, 태풍이 남해안에 상륙할 당시의 기압심도(대기압 1013hPa)과 태풍중심기압과의 기압차)가 68hPa로써 태풍 Maemi(기압심도 63hPa)나 Thelma(기압심도 43hPa)가 남해안에 상륙할 당시 보다 높은 수치를 나타내고 있다. 전라남도 고흥반도 인근으로 상륙하여 한반도의 중앙을 관통한 태풍 Thelma는 태풍 Rusa(0215) 이전 한반도에 내습한 태풍 가운데 재산피해로서는 최고를 기록하였다(이 등, 1990). 또한, 과거최대태풍으로 인식되고 있는 태풍 Maemi는 경남 사천 부근의 해안으로 상륙하여 북북동진하여 경남 함안을 거쳐 경북 울진해안을 통해 동해상으로 빠져나갔다.

Fig. 3.4는 전술한 태풍의 이동경로를 공간적으로 비교한 것이다. 또한, 폭풍해일고의 산정을 위한 계산의 입력값으로서는 Table 3.1~3.3에 각각 나타내고 있는 시각에 따른 태풍의 위치(경도, 위도), 기압심도, 태풍반경 및 이동속도를 이용하였다.

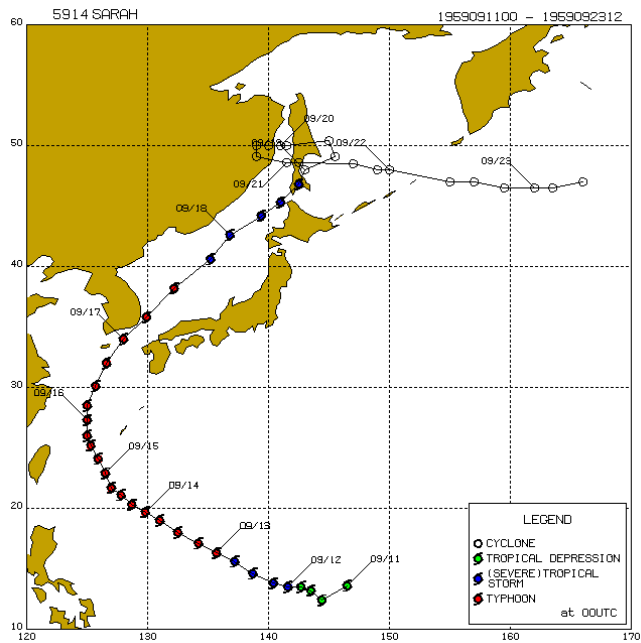


Fig. 3.1 Route of typhoon Sarah.

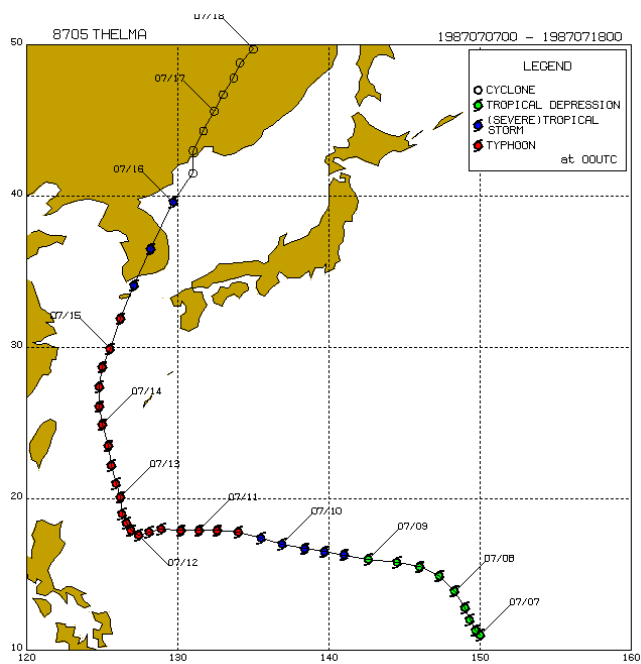


Fig. 3.2 Route of typhoon Thelma.

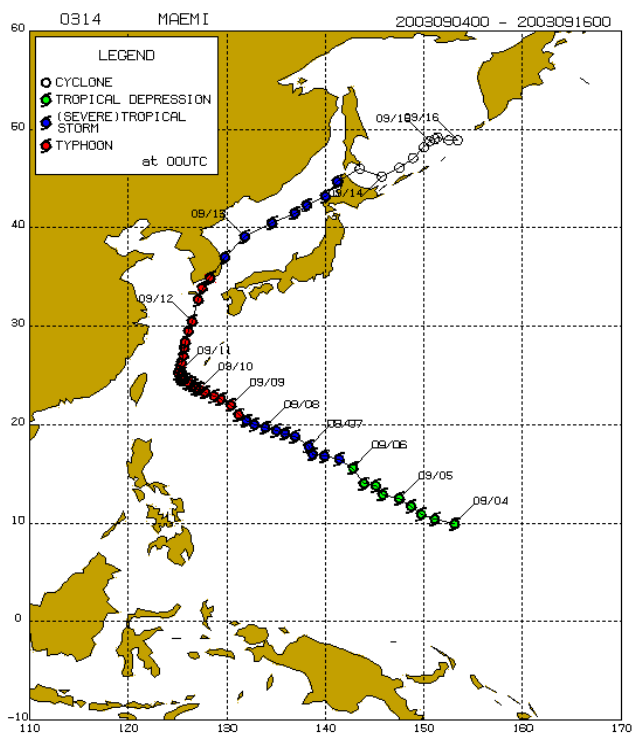


Fig. 3.3 Route of typhoon Maemi.

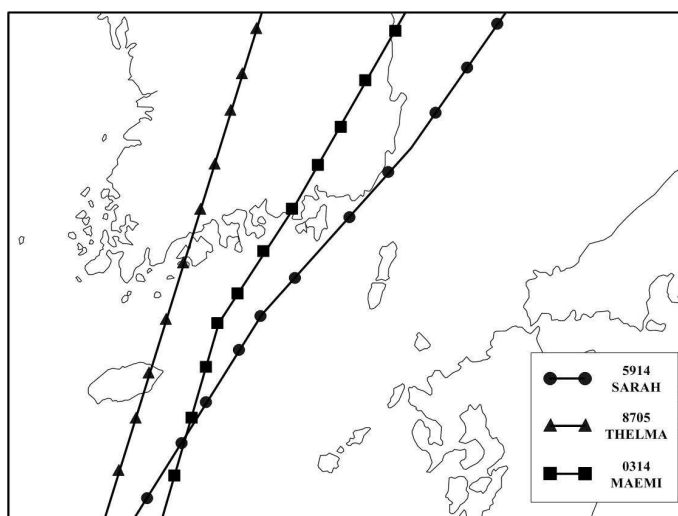


Fig. 3.4 Routes of typhoons used in numerical simulation.

Table 3.1 Characteristics of typhoon Sarah.

| 시 각 | 경 도 (°E) | 위 도 (°N) | 기압심도 (hPa) | 태풍반경 (km) | 이동속도 (km/h) |
|------------|-------------|-------------|---------------|--------------|----------------|
| 5909151800 | 125.000 | 26.000 | 108.0 | 35.0 | 24.0 |
| 5909160000 | 125.000 | 27.300 | 108.0 | 33.0 | 22.2 |
| 5909160600 | 125.000 | 28.500 | 78.0 | 51.0 | 32.3 |
| 5909161200 | 125.700 | 30.100 | 78.0 | 52.0 | 37.4 |
| 5909161800 | 126.600 | 32.000 | 78.0 | 55.0 | 42.9 |
| 5909170000 | 128.000 | 34.000 | 68.0 | 71.0 | 44.1 |
| 5909170600 | 129.900 | 35.800 | 63.0 | 96.0 | 56.0 |
| 5909171200 | 132.200 | 38.200 | 48.0 | 134.0 | 62.0 |
| 5909171800 | 135.200 | 40.600 | 43.0 | 170.0 | 43.3 |

Table 3.2 Characteristics of typhoon Thelma.

| 시 각 | 경 도 (°E) | 위 도 (°N) | 기압심도 (hPa) | 태풍반경 (km) | 이동속도 (km/h) |
|------------|-------------|-------------|---------------|--------------|----------------|
| 8707140600 | 124.800 | 26.100 | 68.0 | 96.0 | 24.0 |
| 8707141200 | 124.800 | 27.400 | 73.0 | 73.0 | 24.3 |
| 8707141800 | 125.000 | 28.700 | 68.0 | 85.0 | 23.6 |
| 8707150000 | 125.500 | 29.900 | 63.0 | 79.0 | 38.6 |
| 8707150600 | 126.200 | 31.900 | 58.0 | 112.0 | 43.0 |
| 8707151200 | 127.100 | 34.100 | 43.0 | 119.0 | 47.4 |
| 8707151800 | 128.200 | 36.500 | 38.0 | 158.0 | 61.4 |
| 8707160000 | 139.700 | 39.600 | 33.0 | 168.0 | 39.7 |
| 8707160600 | 131.000 | 41.500 | 33.0 | 199.0 | 27.8 |

Table 3.3 Characteristics of typhoon Maemi.

| 시 각 | 경 도 (°E) | 위 도 (°N) | 기압심도 (hPa) | 태풍반경 (km) | 이동속도 (km/h) |
|------------|-------------|-------------|---------------|--------------|----------------|
| 0309111500 | 125.300 | 25.900 | 0.0 | 38.0 | 10.0 |
| 0309111800 | 125.400 | 26.300 | 46.5 | 38.0 | 15.0 |
| 0309112100 | 125.600 | 27.000 | 83.0 | 38.0 | 20.0 |
| 0309120300 | 125.800 | 28.400 | 73.0 | 40.0 | 25.0 |
| 0309120600 | 126.100 | 29.500 | 68.0 | 40.0 | 30.0 |
| 0309120900 | 126.500 | 30.500 | 68.0 | 38.0 | 35.0 |
| 0309121200 | 126.900 | 31.700 | 68.0 | 38.0 | 35.0 |
| 0309121500 | 127.000 | 32.700 | 68.0 | 50.0 | 40.0 |
| 0309121700 | 127.300 | 33.500 | 68.0 | 55.0 | 40.0 |
| 0309122100 | 128.300 | 34.800 | 63.0 | 50.0 | 45.0 |
| 0309130300 | 129.700 | 36.900 | 43.0 | 90.0 | 45.0 |
| 0309131500 | 134.800 | 40.500 | 33.0 | 110.0 | 45.0 |

3.1.2 대상영역

폭풍해일 시뮬레이션의 대상영역은 Fig. 3.5에 나타내는 것과 같이 태풍의 주경로가 놓이는 한국 및 일본과 태평양을 포함하는 광역으로 설정되었다. 대상으로 하는 관심영역에서 계산정도를 높이기 위하여 계산영역을 제1영역에서 제8영역까지 nesting하여 계산을 수행하였다. 계산격자의 구성은 제1영역에서 32.4km의 격자크기로 시작하여 순차적으로 16.2km, 5.4km, 1.8km, 600m, 200m, 100m의 격자간격을 이용하였으며, 관심영역인 제8영역은 녹산국가산업단지 연안역으로 설정하고, 최소격자간격 50m로 설정하였다. 현재 건설이 진행중인 부산 신항만의 완공이 녹산국가산업단지 연안역에 미치는 영향으로 고려하기 위해서 신항이 완공되었을 경우와 현상태에 대해 각각 계산을 수행하였다. Table 3.4에는 격자에 대한 상세한 정보가 제시되어 있으며, Imesh와 Jmesh는 I, J방향으로 격자의 갯수를 나타낸다. Fig. 3.6은 Fig. 3.5에 나타낸 각 영역에서 보다 상세한 영역범위와 등수심선을 나타내고 있다.

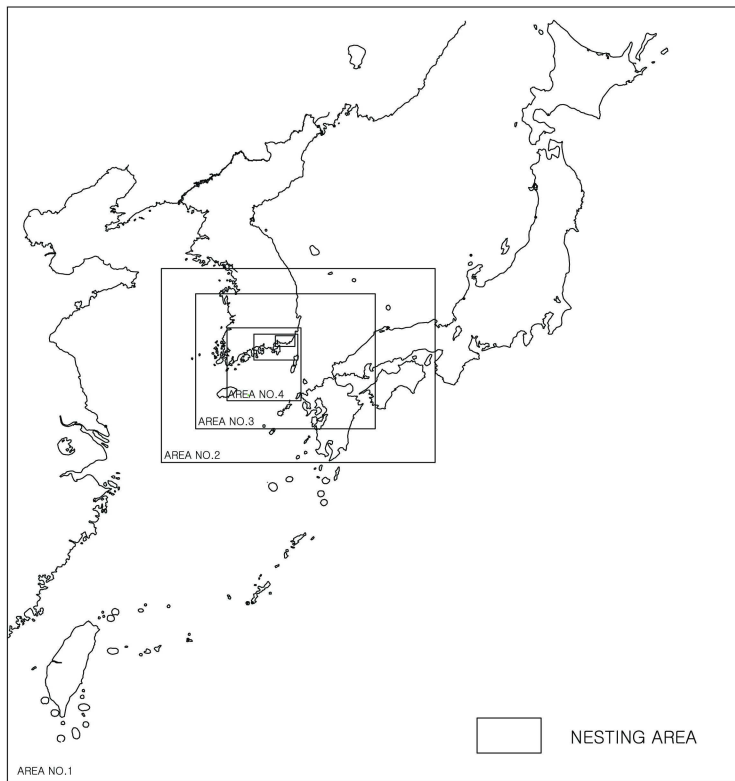
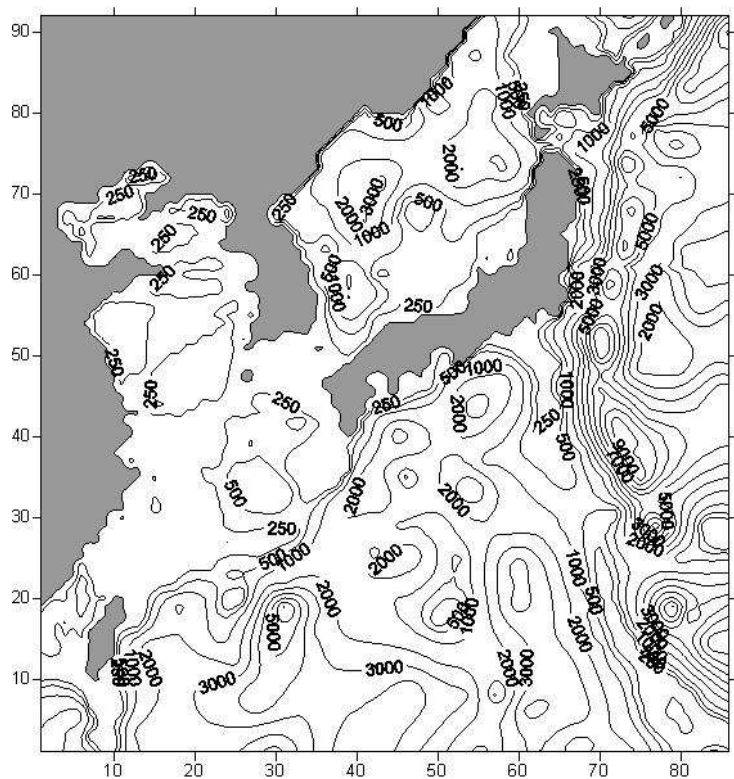


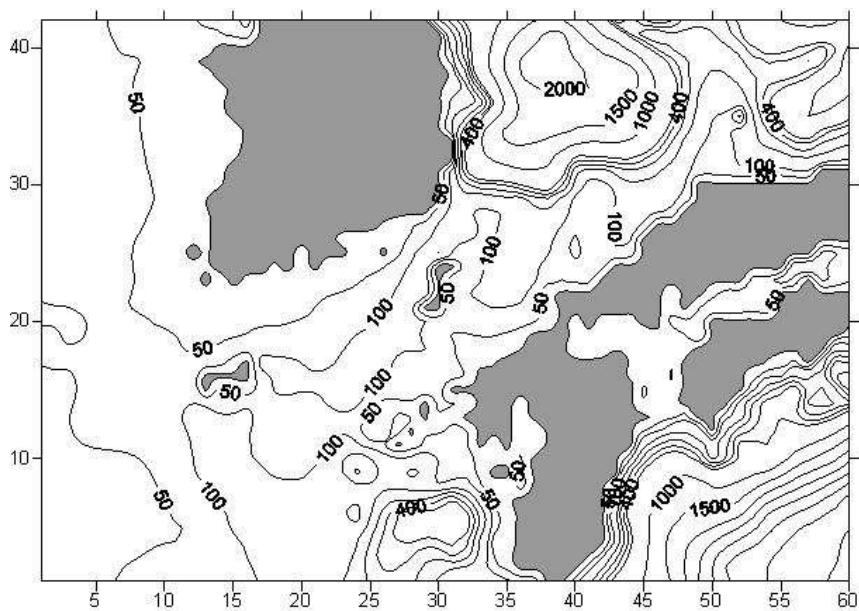
Fig. 3.5 Calculating areas of storm surge simulation.

Table 3.4 Mesh sizes applied to each area.

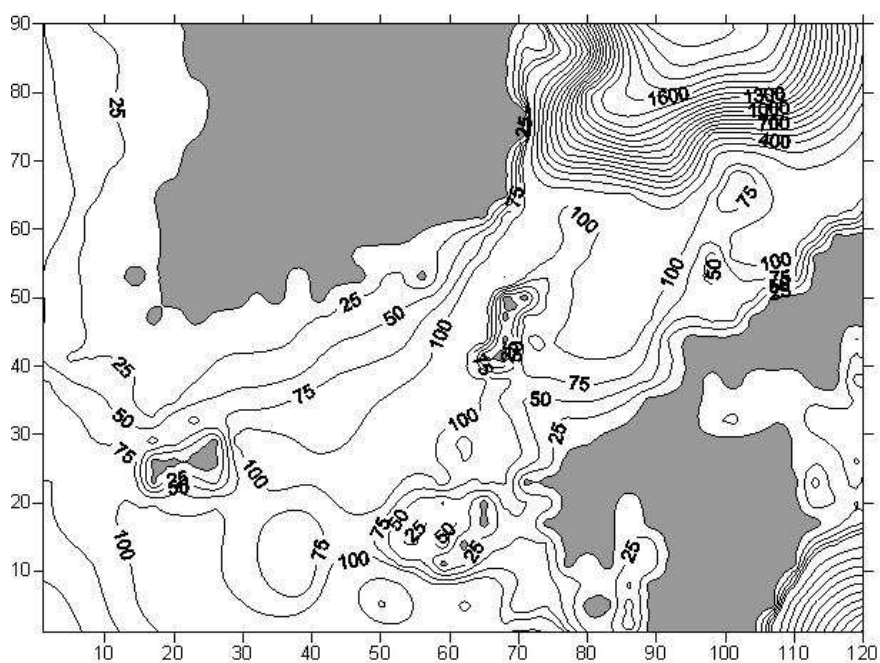
| 영역 번호 | <i>Mesh size(m)</i> | <i>Imesh × Jmesh</i> |
|-----------|---------------------|----------------------|
| AREA NO.1 | 32,400 | 86×72 |
| AREA NO.2 | 16,200 | 60×42 |
| AREA NO.3 | 5,400 | 120×90 |
| AREA NO.4 | 1,800 | 180×150 |
| AREA NO.5 | 600 | 270×159 |
| AREA NO.6 | 200 | 363×198 |
| AREA NO.7 | 100 | 280×200 |
| AREA NO.8 | 50 | 292×144 |



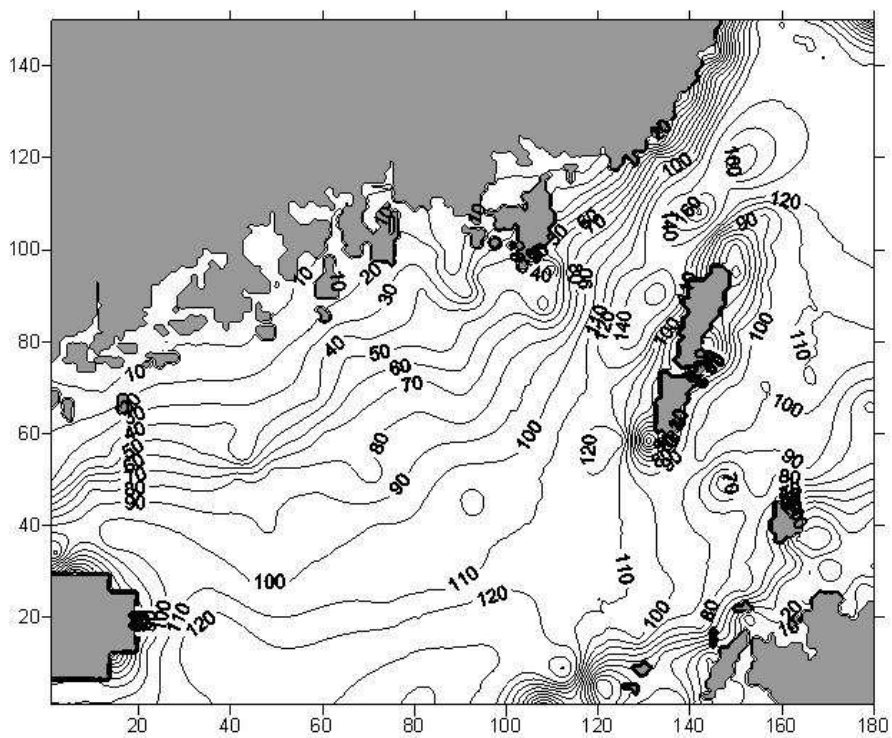
(a) AREA NO.1



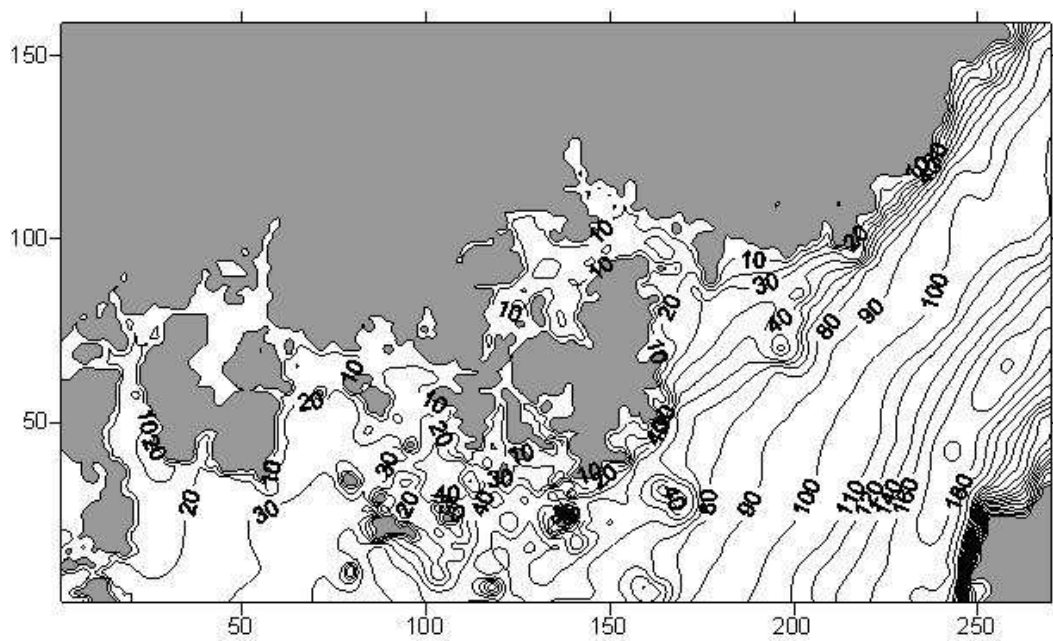
(b) AREA NO.2



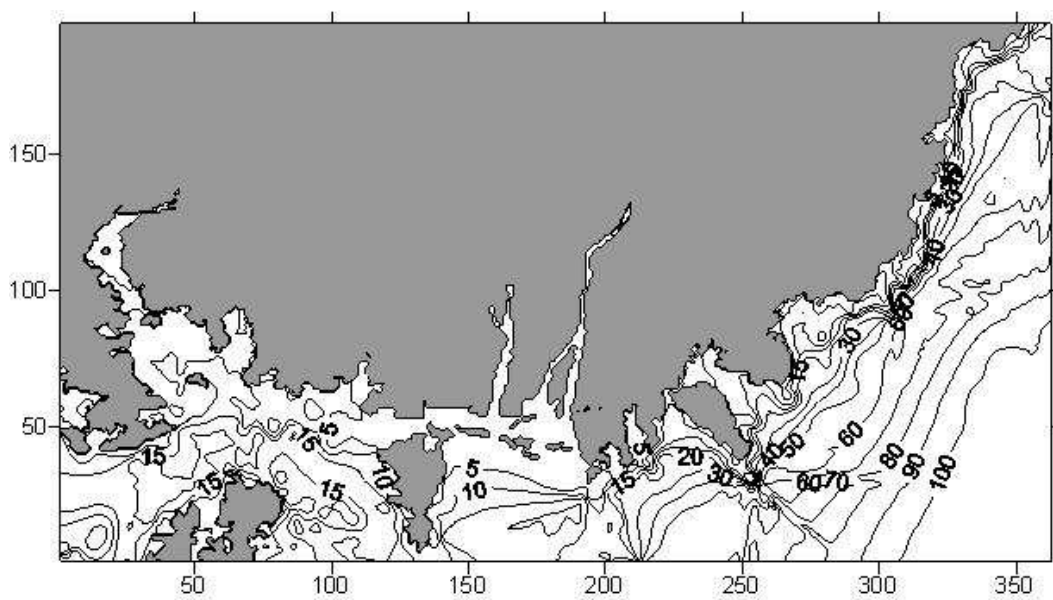
(c) AREA NO.3



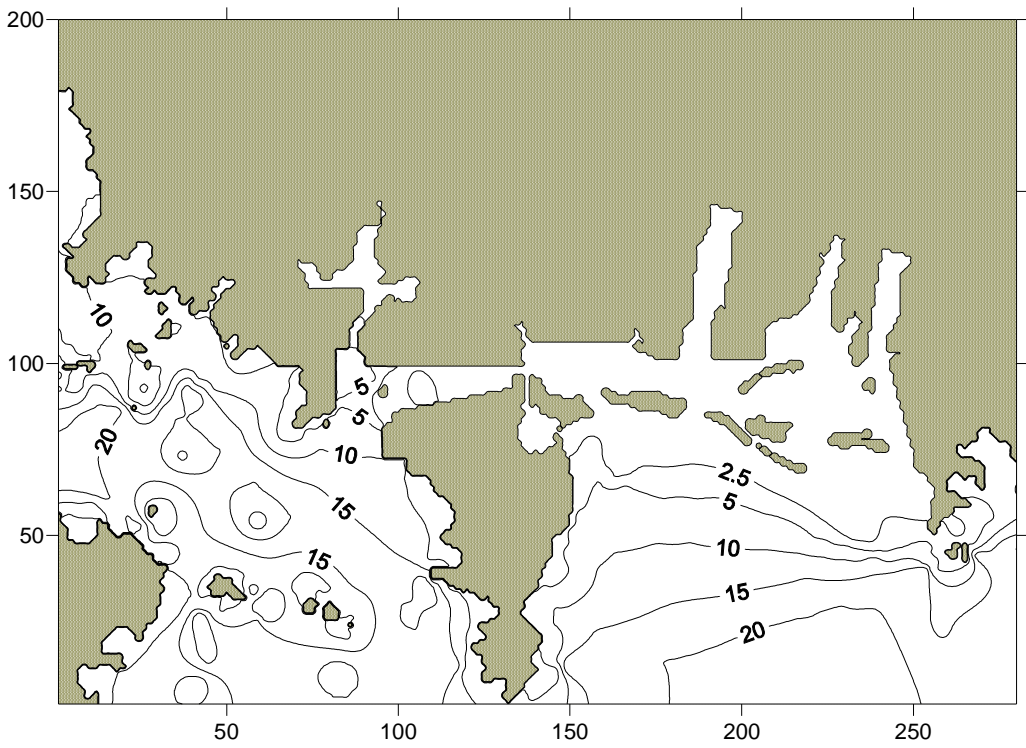
(d) AREA NO.4



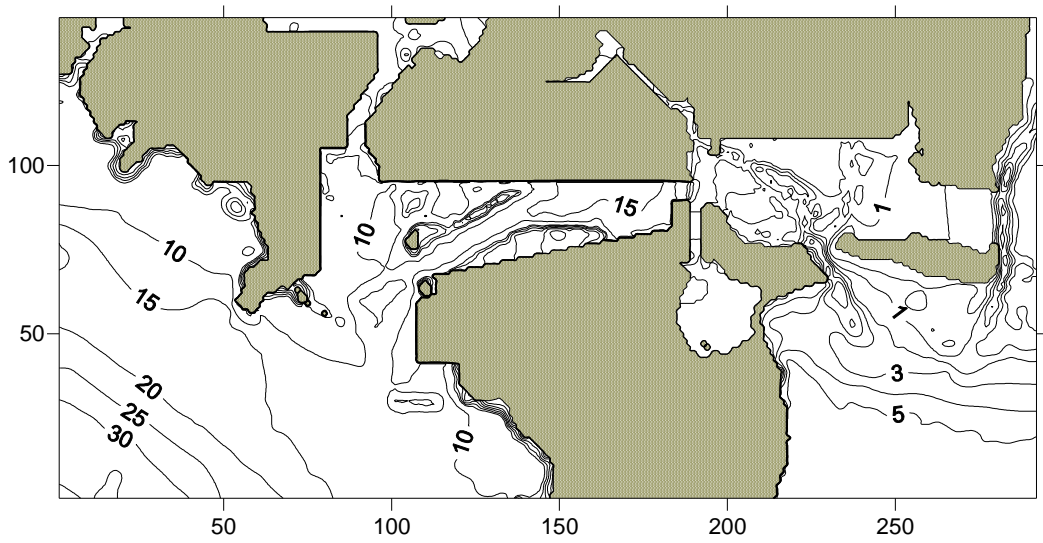
(e) AREA NO.5



(f) AREA NO.6



(g) AREA NO.7



(h) AREA NO. 8

Fig. 3.6 Spatial distributions of water depth in each area.

3.1.3 수치계산의 검증

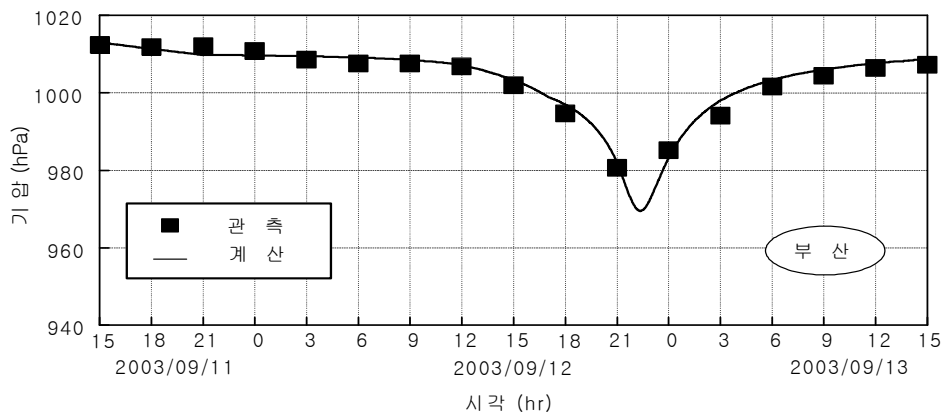
(1) 기압

폭풍해일고의 시뮬레이션을 실시함에 있어서 우선 태풍 Maemi에 대한 수치계산을 수행하여 본 수치시뮬레이션의 타당성을 검토하였다. 폭풍해일의 추산에 이용된 기압분포에는 Myers and Malkin(1961)의 분포식(3.1)을 사용하였고, 최대풍속반경 r_0 는 남해안의 관측기압으로부터 산정되었다.

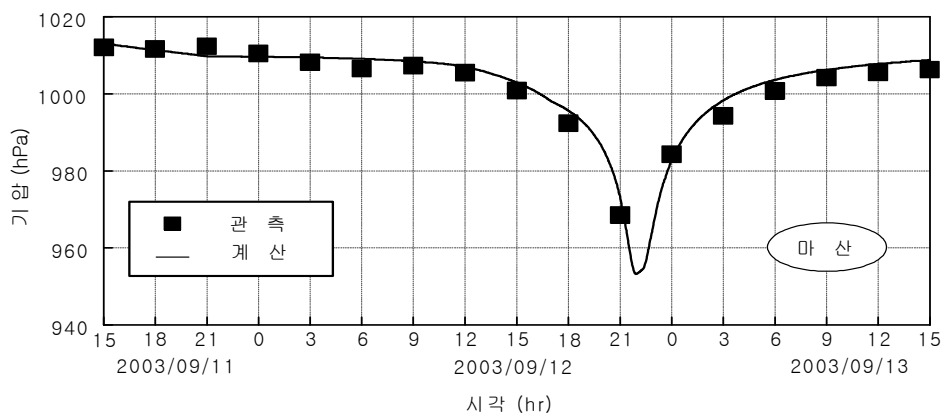
$$p_r = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (3.1)$$

여기서, p_c 는 태풍의 중심기압, Δp 는 기압심도, p_r 는 태풍의 중심으로부터 r 만큼 떨어진 점에서의 기압, r_0 는 태풍반경, r 은 등압선의 곡률반경이다.

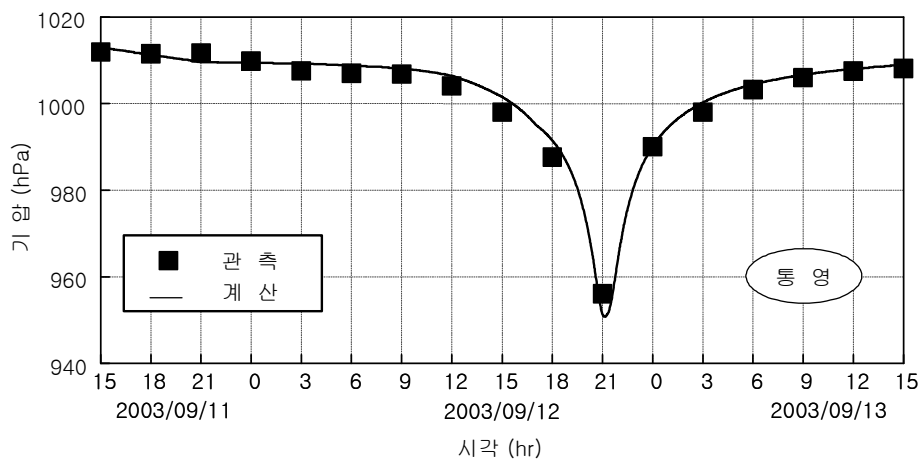
Fig. 3.7은 태풍 Maemi 통과시에 기상대에서 관측된 기압과 수치시뮬레이션에 의한 기압의 시간변화를 비교한 결과이다. 종축과 횡축은 각각 시각 및 기압변화를 나타내고, 짙은 사각형은 관측치를, 실선은 계산치를 각각 나타낸다. 부산의 경우에는 최저기압이 971hPa 정도로, 이는 태풍 Maemi시의 최저기압 950hPa보다는 큰 값을 나타내고 있다. 이는 태풍의 중심경로보다 부산이 우측으로 떨어져 있었기 때문으로 판단된다. 반면에, 중심경로(경남 사천시)에 보다 가까운 통영과 마산으로 갈수록 중심기압이 954hPa과 951hPa 정도의 값을 나타내고 있으며, 최저기압 950hPa에 가까운 수치를 나타낸다. Fig. 3.7을 통해 알 수 있는 바와 같이 시각의 변화에 따라 각 지역에서의 기압의 변화는 관측치 및 해석치 모두 전체적으로 잘 일치하는 경향을 알 수 있다.



(a) Busan



(b) Masan



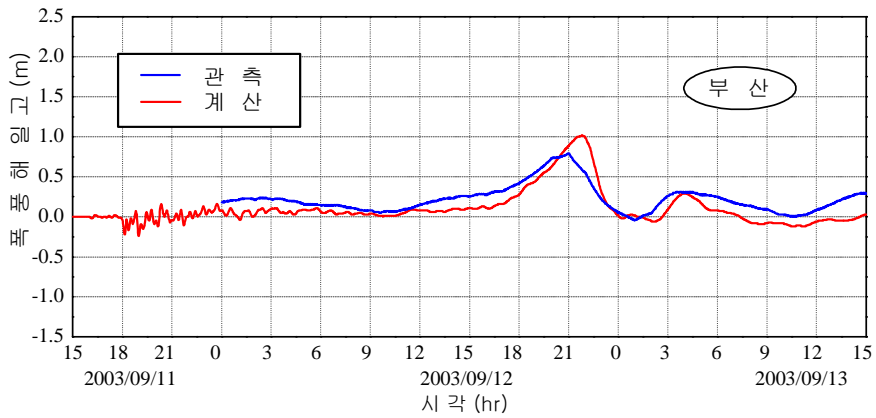
(c) Tongyeong

Fig. 3.7 Comparison of atmospheric pressure between measured and calculated results for typhoon Maemi.

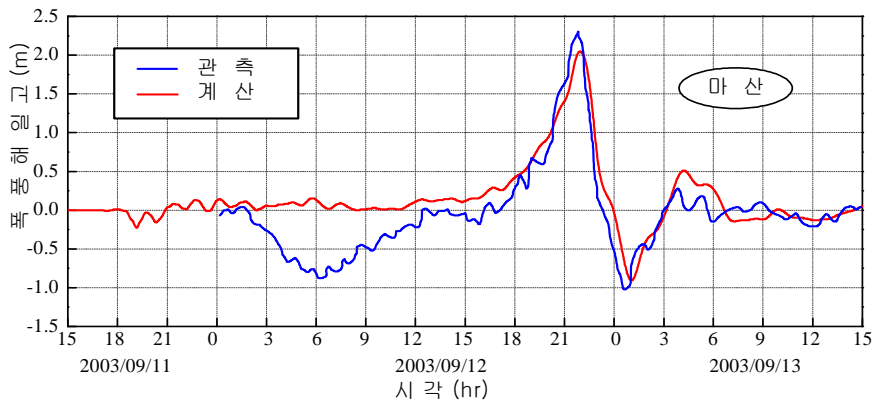
(2) 폭풍해일고

태풍 Maemi 내습시에 부산 연안에 설치되어 있는 파랑관측소 및 검조소로부터 폭풍해일고(기록조위-예측조위)를 얻을 수 있지만, 고파랑에 의한 유실 및 결측 등으로 신뢰할 수 있는 조위기록은 많지 않다. 폭풍해일고에 대해서 부산항 검조소와 인근 마산항 및 통영 검조소의 기록과 비교·검토하여 수치시물레이션에 의한 결과의 타당성을 검증하였다.

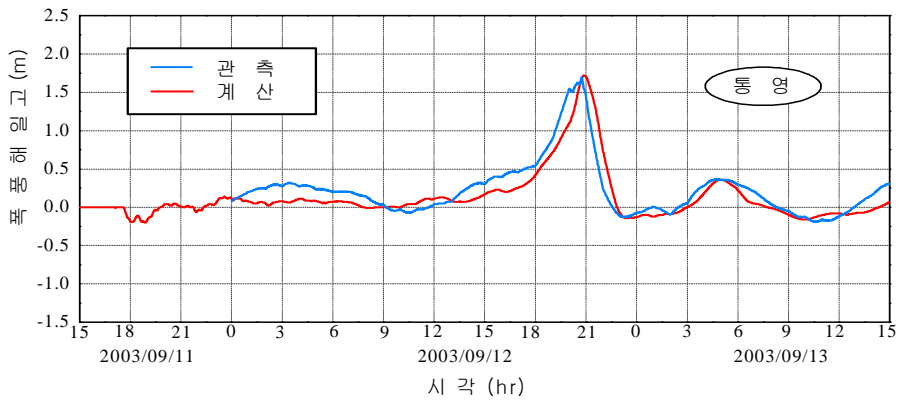
Fig. 3.8은 태풍 Maemi 통과시에 각 검조소에서 관측된 폭풍해일고와 수치시물레이션에 의한 폭풍해일고의 시간변화를 비교한 결과이다. Fig. 3.8(a)의 부산항 검조소에서 관측된 해일고와 해석된 해일고를 비교한 결과를 보면 폭풍해일고의 최대치가 발생하는 시각에서 계산결과가 약간 늦게 나타난다. 그 값에서 관측치는 0.8m 정도이고 계산치는 1.0m 정도를 나타내어 계산치가 다소 큰 값을 나타내지만 만족스러운 대응성을 갖는 것으로 판단된다. Fig. 3.8(b)의 마산항 검조소에서 관측된 해일고와 본 연구에서 해석된 해일고를 비교한 결과에서 태풍이 본격적으로 상륙하기 전인 2003년 9월 11일 06시 전후의 관측기록에서 해일고가 하강하고 있는 현상은 일반적으로 이해될 수 없는 현상이며, 이는 기계의 오작동으로 판단된다. 이 부분을 제외하면 시각의 변화에 따른 폭풍해일고의 변화는 매우 잘 일치하는 것으로 판단되며, 여기서 피크치를 나타내고 있는 2003년 9월 12일 22시 전후에서 관측치는 2.3m 정도, 해석치는 2.1m 정도로 약간의 차이를 나타내고 있지만, 미소한 것으로 여겨진다. Fig. 3.8(c)의 통영 검조소에서 얻어진 관측결과와 계산결과를 비교한 것을 보면 부산항 검조소와 마찬가지로 피크치에서 계산결과가 약간 늦게 나타난다. 피크치는 관측이 1.65m, 계산이 1.72m로 매우 잘 일치하며, 동시에 시각의 변화에 따른 폭풍해일고의 변화과정도 매우 잘 일치하는 것으로 판단된다. 폭풍해일고의 피크치에서 계산치가 약간 과소평가되고 있지만, 계산치와 관측치와의 전반적인 일치성을 살펴보면 계산치는 관측치를 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Busan



(b) Masan



(c) Tongyeong

Fig. 3.8 Comparison of storm surge height between measured and calculated results for typhoon Maemi.

3.1.4 최대폭풍해일고

(1) 태풍 Sarah 내습시의 최대폭풍해일고

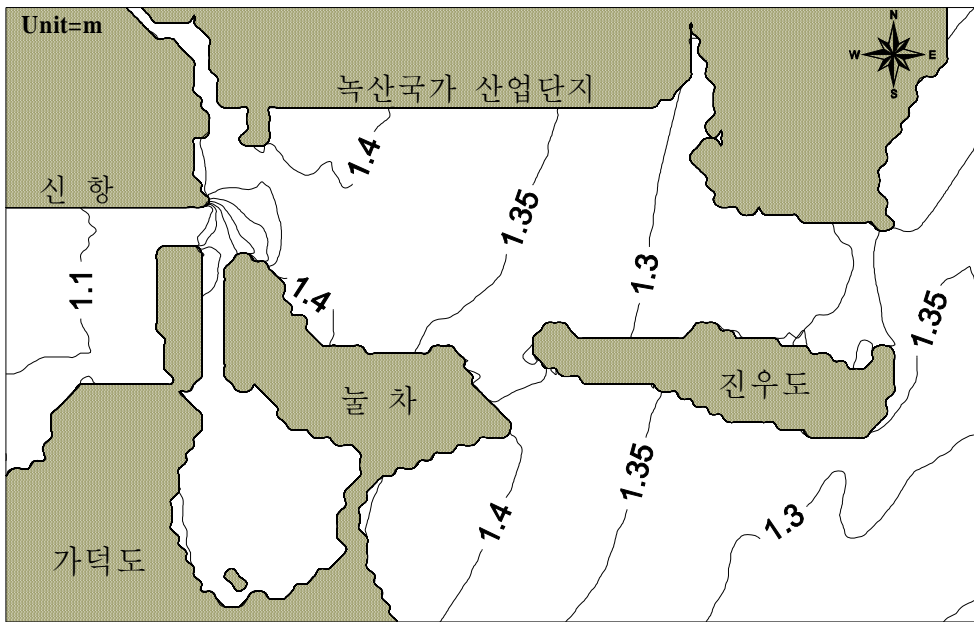
Fig. 3.9는 태풍 Sarah 내습시에 녹산국가산업단지 연안해역에서 최대폭풍해일고의 공간분포를 나타낸 결과이다. 신항 완공전의 경우에 녹산국가산업단지 전면 해역에서 1.45m, 신항만내에서 1.1m 정도의 높이를 각각 나타내고 있으며, 진우도 전면해역에서 1.35m 정도의 크기분포를 나타낸다. 그리고, 신항 완공후의 경우에는 녹산국가산업단지 전면 해역에서 1.46m, 신항만내에서 1.13m 정도의 높이를 각각 나타내고 있으며, 진우도 전면해역에서 1.35m 정도의 크기분포를 나타낸다.

(2) 태풍 Thelma 내습시의 최대폭풍해일고

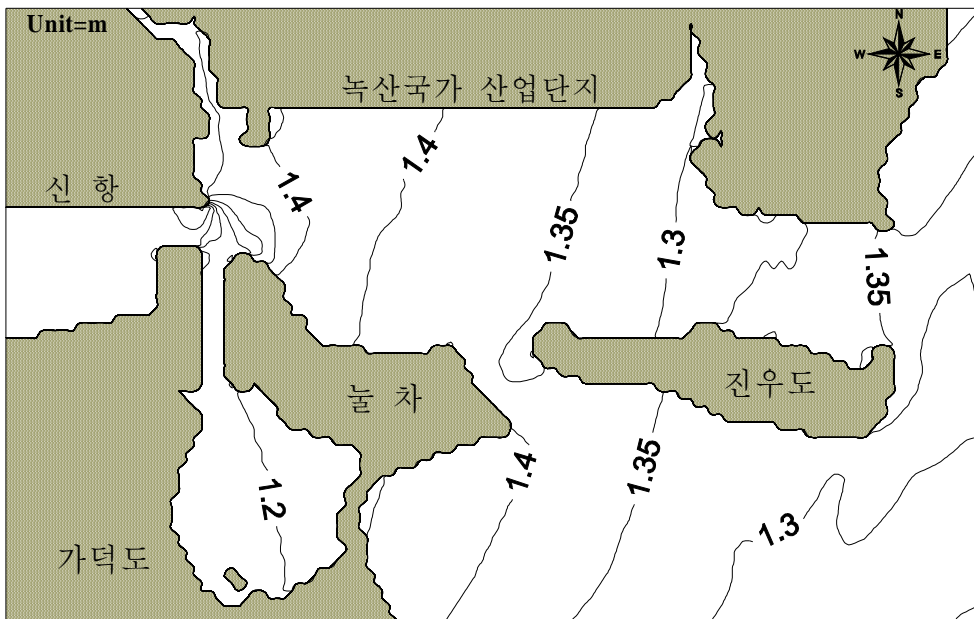
Fig. 3.10은 태풍 Thelma 내습시에 녹산국가산업단지 연안해역에서 최대폭풍해일고의 공간분포를 나타낸 결과이다. 신항 완공전의 경우에 녹산국가산업단지 전면 해역에서 0.79m, 신항만내에서 0.72m 정도의 높이를 각각 나타내고 있으며, 진우도 전면해역에서 0.70m 정도의 크기분포를 나타낸다. 그리고, 신항 완공후의 경우에는 녹산국가산업단지 전면 해역에서 0.79m, 신항만내에서 0.71m 정도의 높이를 각각 나타내고 있으며, 진우도 전면해역에서 0.70m 정도의 크기분포를 나타낸다.

(3) 태풍 Maemi 내습시의 최대폭풍해일고

Fig. 3.11은 태풍 Maemi 내습시에 녹산국가산업단지 연안해역에서 최대폭풍해일고의 공간분포를 나타낸 결과이다. 신항 완공전의 경우에 녹산국가산업단지 전면 해역에서 1.69m, 신항만내에서 1.60m 정도의 높이를 각각 나타내고 있으며, 진우도 전면해역에서 1.47m 정도의 크기분포를 나타낸다. 그리고, 신항 완공후의 경우에는 녹산국가산업단지 전면 해역에서 1.68m, 신항만내에서 1.56m 정도의 높이를 각각 나타내고 있으며, 진우도 전면해역에서 1.45m 정도의 크기분포를 나타낸다.

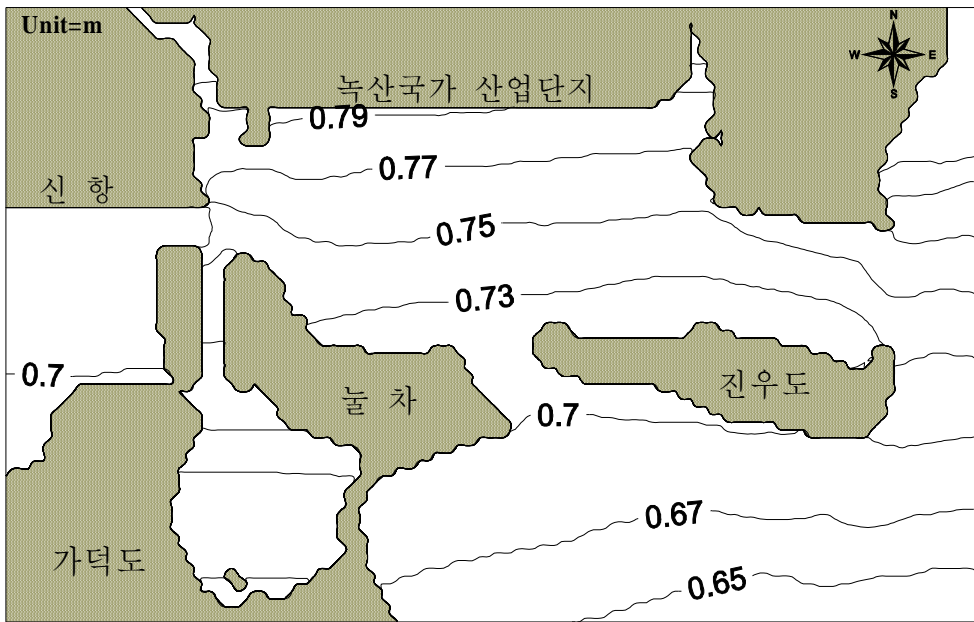


(a) Before construction of Busan new port

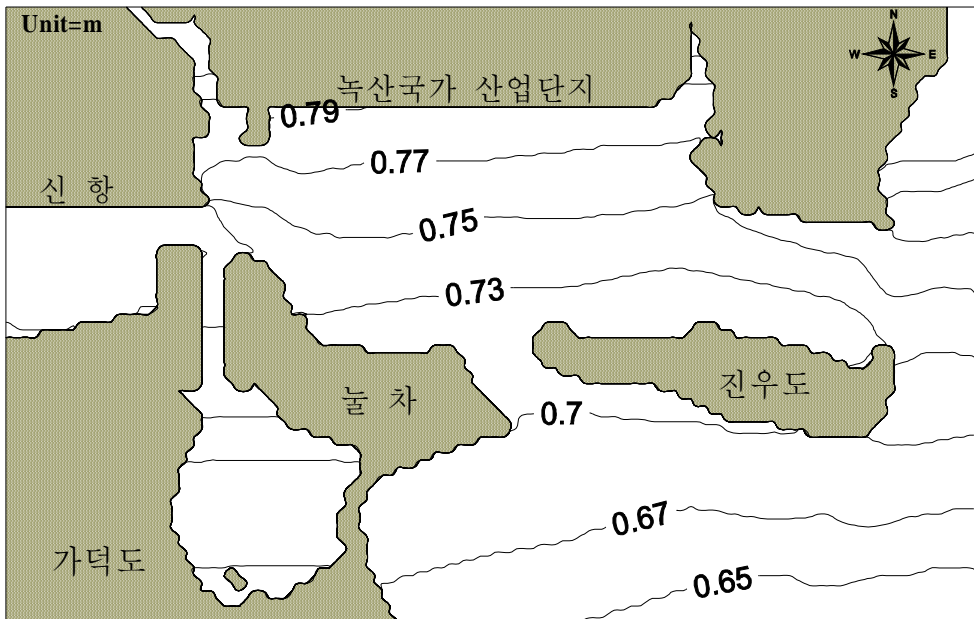


(b) After construction of Busan new port

Fig. 3.9 Spatial distributions of maximum storm surge height for typhoon Sarah.

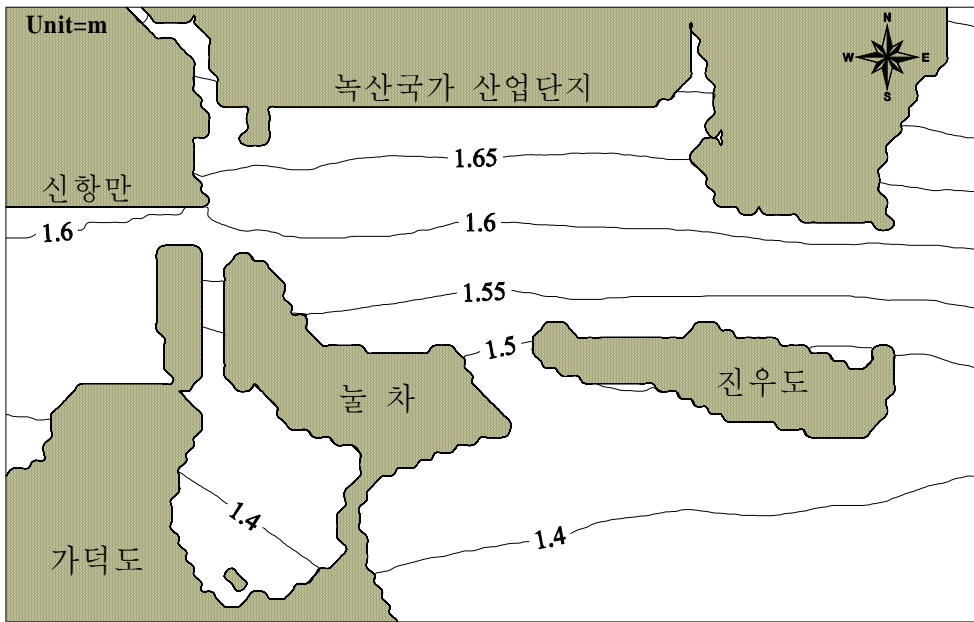


(a) Before construction of Busan new port

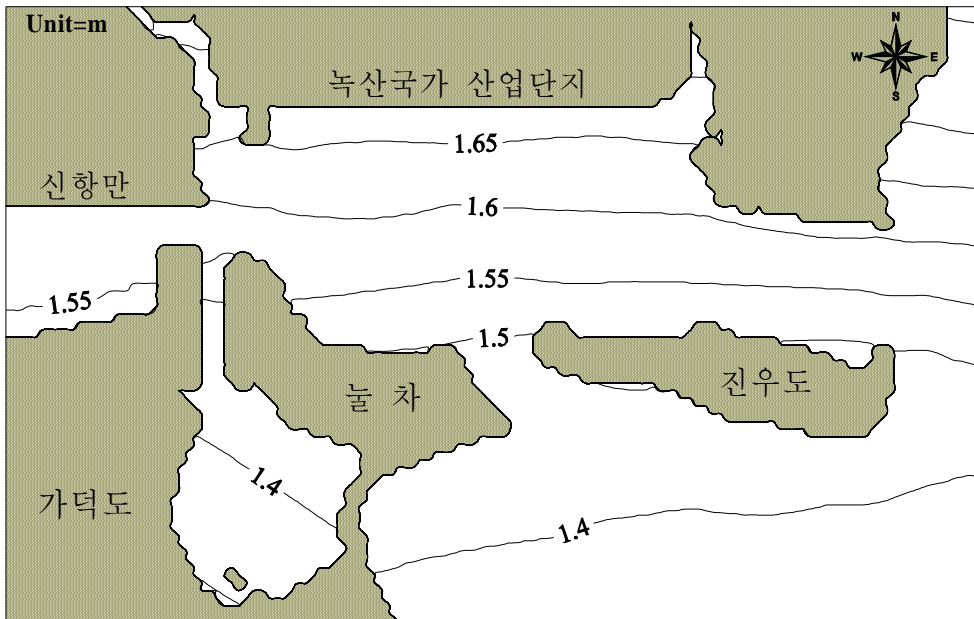


(b) After construction of Busan new port

Fig. 3.10 Spatial distributions of maximum storm surge height for typhoon Thelma.



(a) Before construction of Busan new port



(b) After construction of Busan new port

Fig. 3.11 Spatial distributions of maximum storm surge height for typhoon Maemi.

이상의 3개 태풍(Sarah, Thelma, Maemi)시의 최대폭풍해일고를 종합하여 나타내면 다음의 Table 3.5와 같다. 표로부터 신항의 완공여부가 녹산국가산업단지 전면해역의 최대 폭풍해일고에 미치는 영향은 거의 없으며, 최대폭풍해일고는 태풍 Maemi시에 1.69m로 주어지는 것을 알 수 있다.

Table 3.5 Maximum storm surge heights in cases of typhoon Sarah, Thelma and Maemi.

| 태 풍 명 | 녹산국가산업단지 전면해역에서 최대폭풍해일고(m) | |
|--------|----------------------------|----------|
| | 신 항 완공 전 | 신 항 완공 후 |
| Sarah | 1.45 | 1.46 |
| Thelma | 0.79 | 0.79 |
| Maemi | 1.69 | 1.68 |

3.2 SWAN모델에 의한 천해파랑

3.2.1 대상영역 및 조건

태풍 Maemi에 의해 많은 피해를 입었던 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지를 대상으로 천해파랑을 추산하였다. 해당지역에 영향을 미칠 수 있는 모든 연안격자점의 신심해설계파를 고려하기 위해 광역은 200m, 중역은 50m, 협역은 20m의 격자크기로 설정하여 순차적으로 계산을 수행하였으며, 격자구성에 대한 제반사항을 Table 3.6에, 계산영역을 Fig. 3.12에 제시한다. 고려된 계산영역의 수심데이터와 해안선은 기본적으로 수치해도를 이용하였으며, 협역에서 충분하지 않은 수심데이터에 대해서는 실제 측량데이터를 추가하여 사용하였다. 각 영역의 수심에 대해서는 Fig. 3.13에 나타내었다. 그리고, 전절에서 해석된 바람장을 계산영역에 일치하도록 계산에 필요한 바람장 데이터를 추출하였다. 각 영역에서 천해파랑을 추정할 때에 적용한 약최고고조위(해양수산부, 2005)와 3.1절에서 추산한 최대폭풍해일고는 다음의 Table 3.7(태풍 Maemi 내습시)과 같으며, 50년 재현빈도에 대한 심해파랑의 조건으로 부산 인근해역에서 검토된 모든 심해파랑조건(한국해양연구원, 2005)을 나타내면 Table 3.8과 같다. 해안선의 상태에 따라 적용한 반사율(Goda, 1985)의 값을 Table 3.9에 제시하였고, 반사율내 괄호()안의 값이 실제로 사용된 반사율이다.

Table 3.6 Mesh sizes applied to each area.

| 구 분 | Mesh Size(m) | Imesh×Jmesh | 비 고 |
|-----------|--------------|-------------|-------------------|
| AREA No.1 | 200 | 385×300 | 광역 |
| AREA No.2 | 50 | 416×320 | 중역 No.1-(35,106) |
| AREA No.3 | 20 | 420×290 | 협역 No.2-(170,144) |

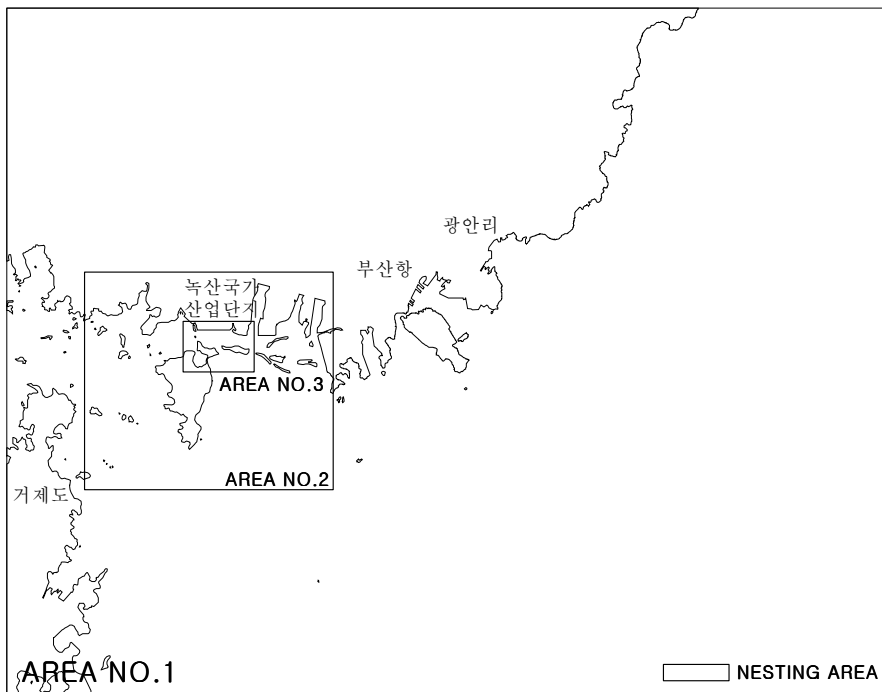
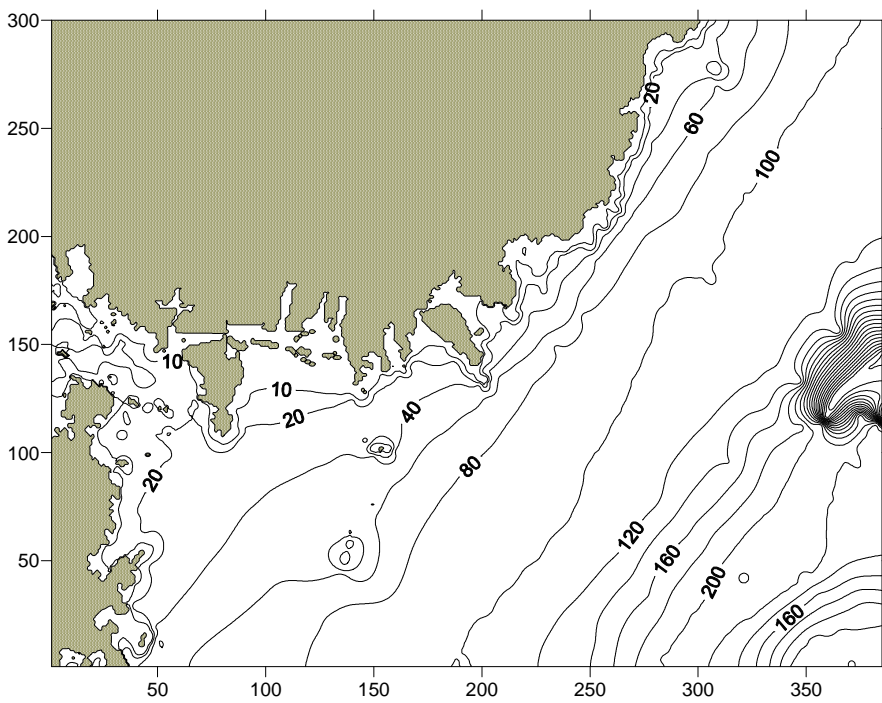
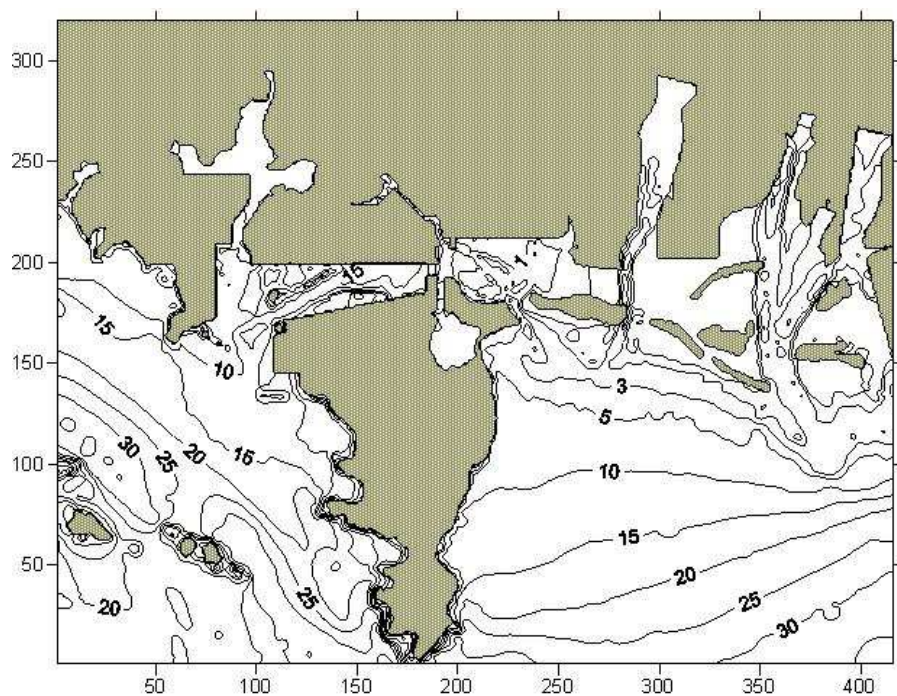


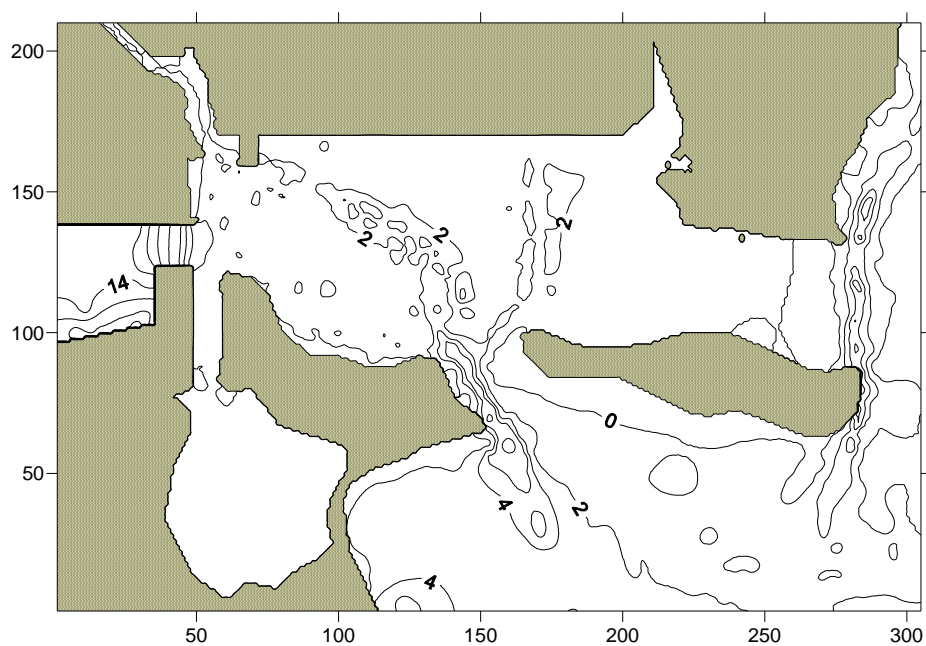
Fig. 3.12 Computation areas of SWAN simulation.



(a) Wide area



(b) Middle area



(c) Object area

Fig. 3.13 Spatial distributions of water depth in each area.

Table 3.7 Design water levels for typhoon Maemi.

| 구 분 | 약최고 고조위 (m) | 최대폭풍해일고(m) | | 약최고고조위 +최대폭풍해일고(m) | |
|-----------|-------------------|------------|------------|-----------------------|------------|
| | | 신항 완공 전 | 신항 완공 후 | 신항 완공 전 | 신항 완공 후 |
| AREA No.1 | 1.906 | 1.69 | 1.68 | 3.596 | 3.586 |
| AREA No.2 | 1.906 | 1.69 | 1.68 | 3.596 | 3.586 |
| AREA No.3 | 1.906 | 1.69 | 1.68 | 3.596 | 3.586 |

Table 3.8 Deepwater design waves for Noksan coast.

| 심해파랑 지점 | 유의파고 $H_s(m)$ | 유의주기 $T_s(s)$ | 파 향 | 비 고 |
|--------------------------------------|---------------|---------------|-----|--------|
| N 34.80° E 128.83° 격자번호 072125 | 6.12 | 11.91 | SSW | Case 1 |
| | 9.63 | 14.18 | S | Case 2 |
| | 12.47 | 15.54 | SSE | Case 3 |
| N 34.80° E 129.00° 격자번호 073125 | 11.37 | 15.41 | S | Case 4 |
| | 11.91 | 14.49 | SE | Case 5 |
| | 12.39 | 15.50 | SSE | Case 6 |

Table 3.9 Reflection coefficients.

| 구 분 | 반 사 율 |
|------------|----------------|
| 자연해빈 | 0.05~0.2 (0.1) |
| 이형콘크리트블록사면 | 0.2~0.4 |
| 사석사면 | 0.3~0.5 (0.4) |
| 완경사벽면 | 0.4~0.8 |
| 직립벽, 급경사벽면 | 0.8~1.0 (0.9) |
| 이형소파블록 | 0.3~0.5 (0.4) |

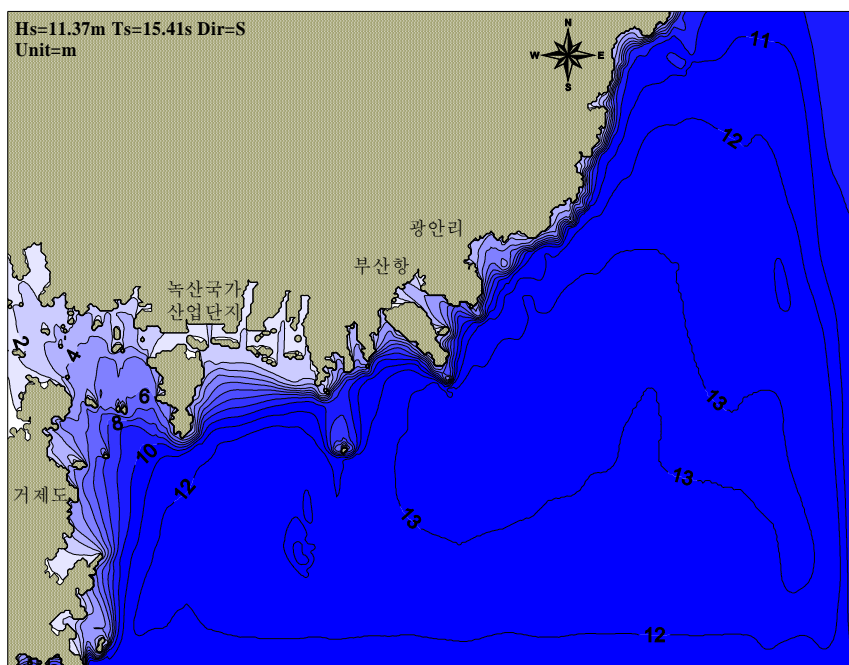
3.2.2 수치해석결과

녹산국가산업단지의 파랑산정에 영향을 미칠 수 있는 신항의 건설 상황을 고려하기 위해서 신항의 현재 상태와 차후 완공이 되었을 때의 상태에 대해 각각 계산을 수행하였으며, Fig. 3.14~3.17은 Table 3.7의 설계조위 및 Table 3.8에 제시된 심해파랑조건을 적용하여 산정된 파고분포 및 wave-setup의 일례(Table 3.8의 Case 4)를 나타낸 것이다.

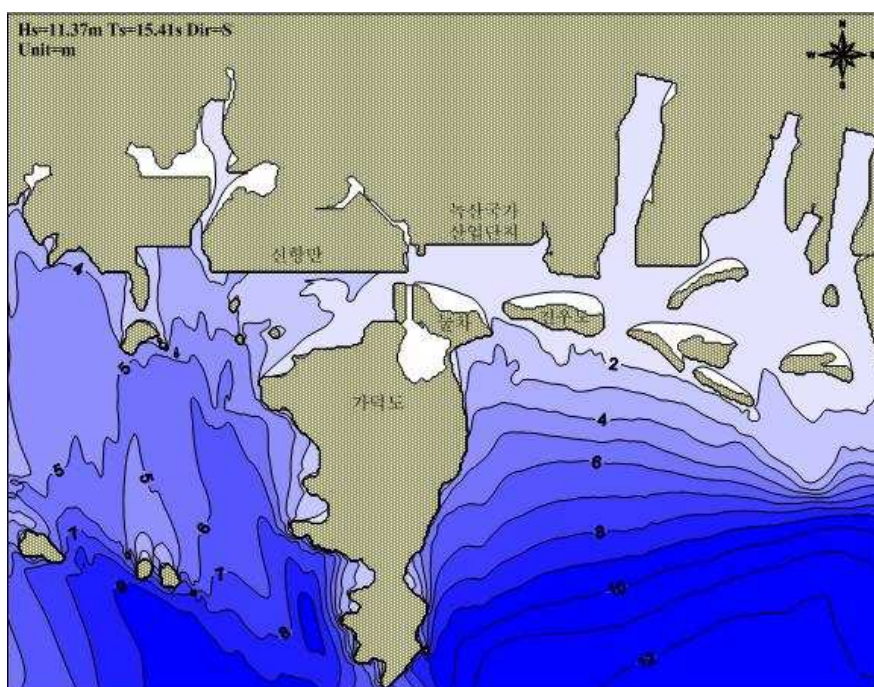
(1) 신항 완공전

Fig. 3.14(a)는 Table 3.7의 설계조위 및 Table 3.8에 제시된 $\langle H_s=11.37m, T_s=15.41s, Dir=S \rangle$ 의 심해파랑조건을 적용하여 산정된 광역에서 파고분포를 나타낸 결과이다. 영역 전반적으로 12m 이상의 파고분포를 보이고 있으며 부분적으로 13m 이상의 파고분포가 나타난다. Fig. 3.14(b)는 신항만, 가덕도, 녹산국가산업단지의 인근해역에서 공간파고분포를 나타낸 결과이다. 가덕도 동측에서 12m 이상의 파고가 녹산국가산업단지 전면해역으로 진행함에 따라 천수, 굴절, 회절 및 쇄파 등의 영향으로 2m까지 감소하고, 가덕도 서측 역시 파랑변형에 의해 파고가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3.14(c)는 녹산국가산업단지의 인근해역에서 각 심해파랑조건에 따른 협역에서 공간파고분포를 나타낸 결과이다. 산정된 파고분포를 살펴보면 진우도의 좌측에 있는 개구부로부터 입사파랑이 녹산국가산업단지 전면해역의 파고분포에 큰 영향을 미치며, 이로 인하여 개구부의 바로 배후위치에서 가장 큰 파고값 1.54m를 나타내고, 이를 중심으로 좌우로 작은 파고값을 나타낸다. 또한, 신항만에서 녹산국가산업단지 전면해역으로 파랑이 입사되고 있음을 알 수 있으며, 신항만으로부터 유입되는 파랑에 의해 전면해역의 좌측에 부분적으로 1.4m의 파고분포가 나타난다. 그리고, 신항만내의 정온도가 1.5m 내외의 분포로 나타나는 것을 알 수 있다.

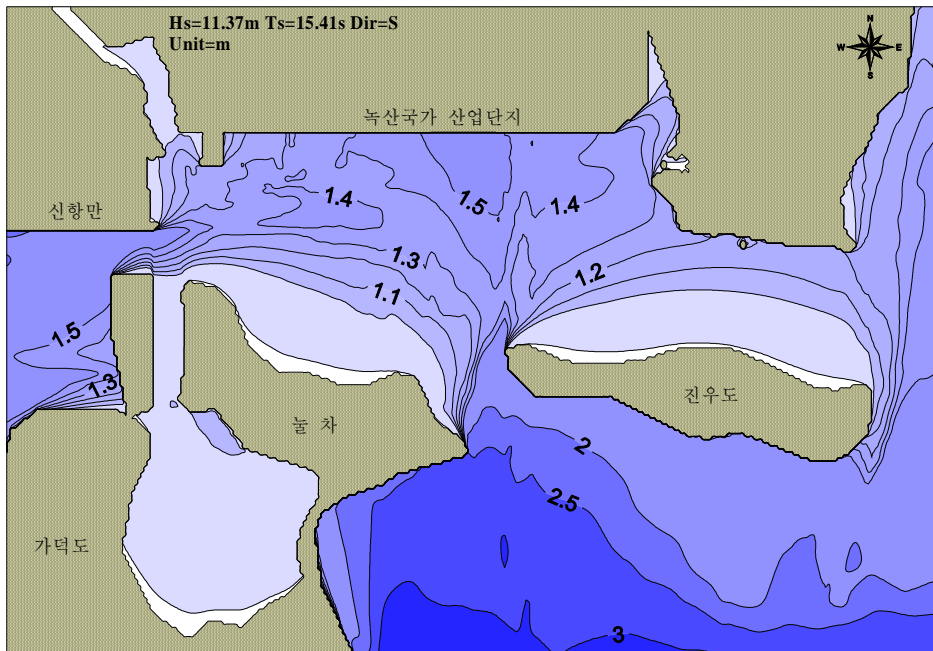
Fig. 3.15는 녹산국가산업단지의 인근해역에서 wave-setup 분포를 나타낸 결과이다. 녹산국가산업단지 전면해역에서 전체적으로 30cm 전후의 wave-setup 분포를 나타내고 있다.



(a) Wide area



(b) Middle area



(c) Object area

Fig. 3.14 Spatial distributions of wave height before construction of Busan new port.

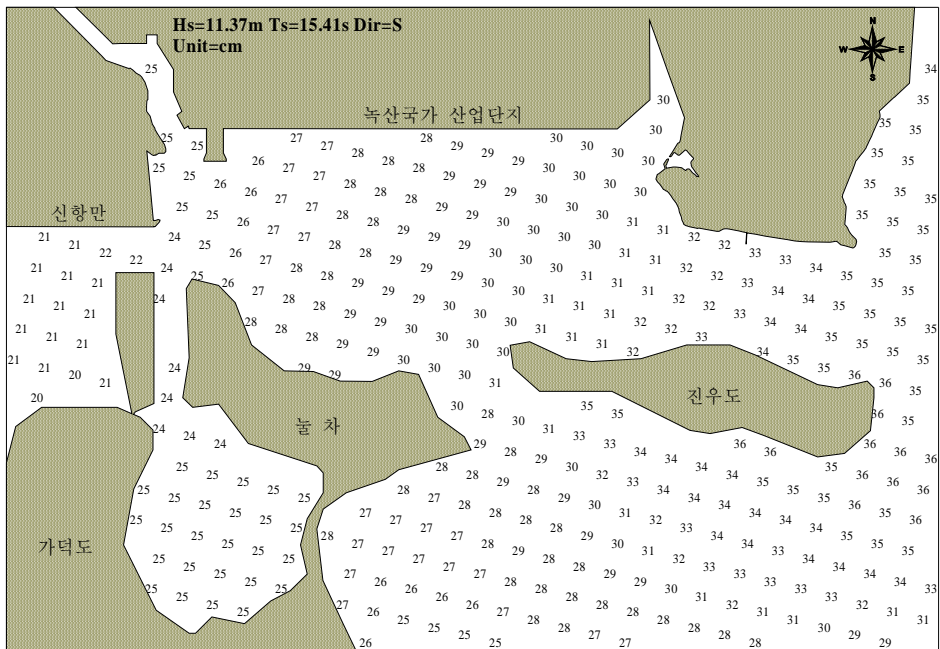
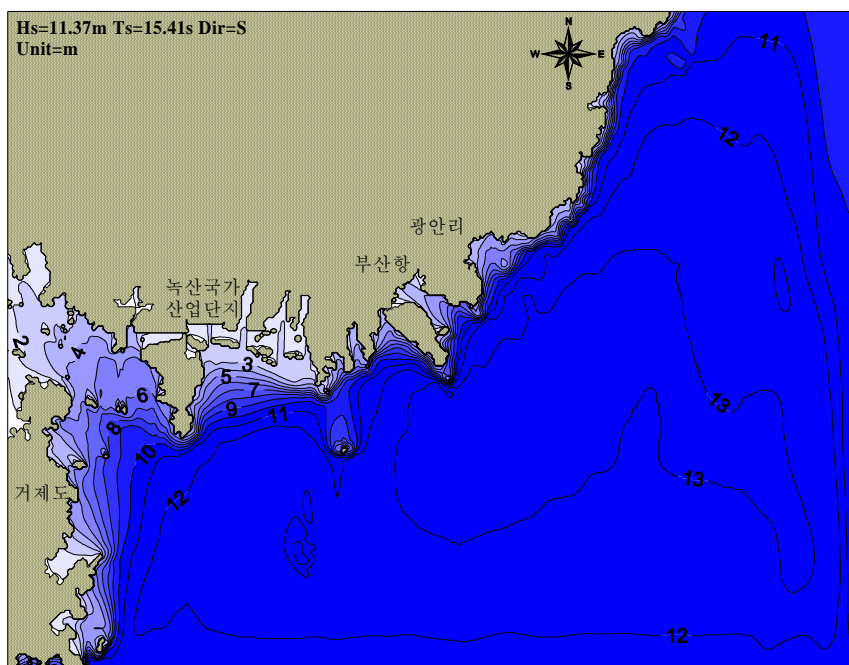


Fig. 3.15 Spatial distribution of wave-setup before construction of Busan new port.

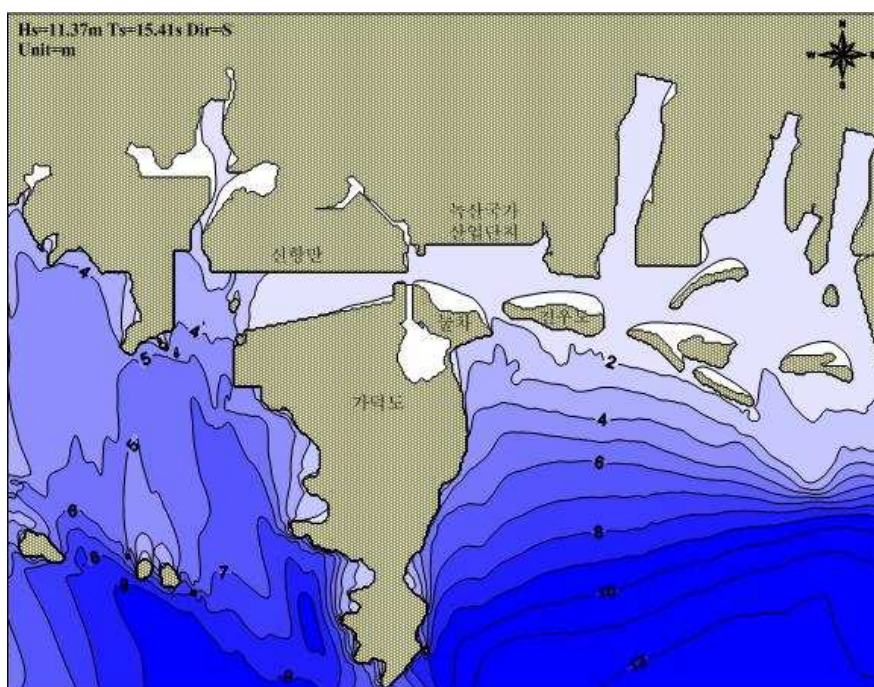
(2) 신행 완공후

Fig. 3.16(a)는 Table 3.7의 설계조위 및 Table 3.8에 제시된 $\langle H_s=11.37\text{m}, T_s=15.41\text{s}, \text{Dir}=S \rangle$ 의 심해파랑조건을 적용하여 산정된 광역에서 파고분포를 나타낸 결과이다. 영역 전반적으로 12m 이상의 파고분포를 보이고 있으며 부분적으로 13m 이상의 파고분포가 나타나기도 한다. Fig. 3.16(b)는 신행 완공후의 경우에 신행만, 가덕도, 녹산국가산업단지의 인근해역에서의 공간파고분포를 나타낸 결과이다. 가덕도 동측에서 12m 이상의 파고가 녹산국가산업단지 전면해역으로 진행함에 따라 천수, 굴절, 회절 및 쇄파등의 영향으로 2m까지 감소하고, 가덕도 서측 역시 파랑변형에 의해 파고가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 다음으로, 신행만의 항내파고는 신행 완공전 경우와 비교하면 신행이 완공됨에 따라서 2.0m 전후의 파고분포가 1.0m 내외로 변하는 양상을 나타낸다. Fig. 3.16(c)는 신행 완공후에 녹산국가산업단지의 인근해역에서 심해파랑조건에 따른 협역에서 공간파고분포를 나타낸 결과이다. 산정된 파고분포를 살펴보면 신행의 영향을 받지 않는 진우도 좌측의 개구부를 통하여 많은 파랑에너지가 녹산국가산업단지의 전면해역으로 전달되며, 이로 인하여 개구부의 바로 배후위치에서 가장 큰 파고값 1.58m를 나타내고, 이를 중심으로 좌우로 작은 파고값을 나타내는 것은 전술한 신행 완공전의 경우와 동일한 경향이다. 또한, 신행만이 완공됨에 따라 신행만내의 정온도가 1.3m 내외의 분포를 나타내고 신행만에서 녹산국가산업단지의 전면해역으로 입사되던 파랑이 감소되었음을 알 수 있으며, 유입되는 파랑이 감소함으로써 녹산국가산업단지 전면해역에 부분적으로 나타나던 1.4m의 파고분포가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이상으로부터, 신행의 완공여부가 녹산국가산업단지 전면해역에서 파랑의 크기에 영향을 거의 미치지 않음을 알 수 있다.

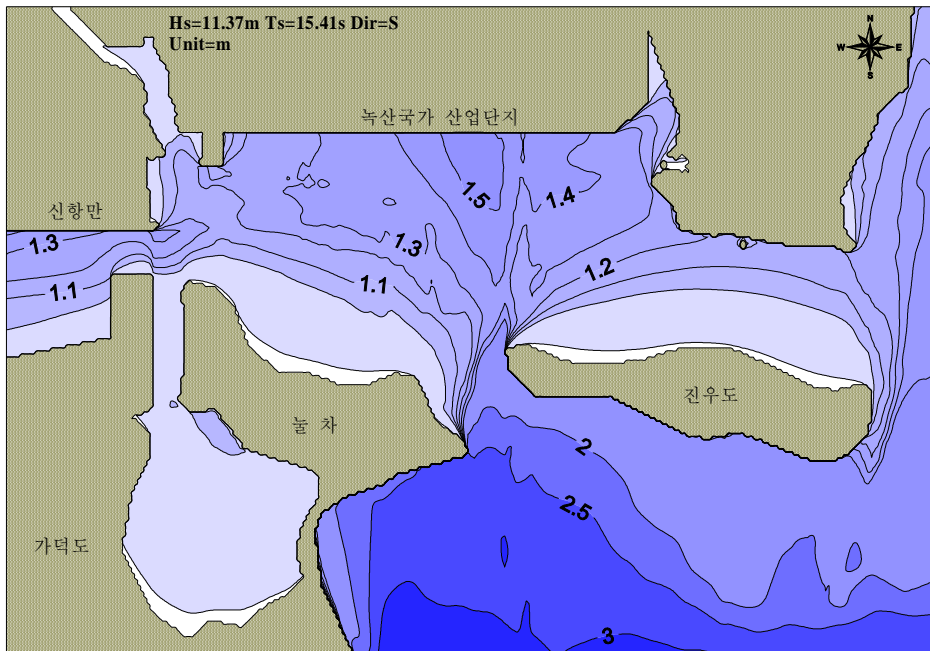
Fig. 3.17은 녹산국가산업단지의 인근해역에서 신행 완공후의 경우에 대해서 협역에서의 wave-setup 분포를 나타낸 결과이다. 신행 완공전의 경우와 마찬가지로 녹산국가산업단지 전면해역에서 전체적으로 30cm 전후의 wave-setup 분포를 나타내고 있다.



(a) Wide area



(b) Middle area



(c) Object area

Fig. 3.16 Spatial distributions of wave height after construction of Busan new port.

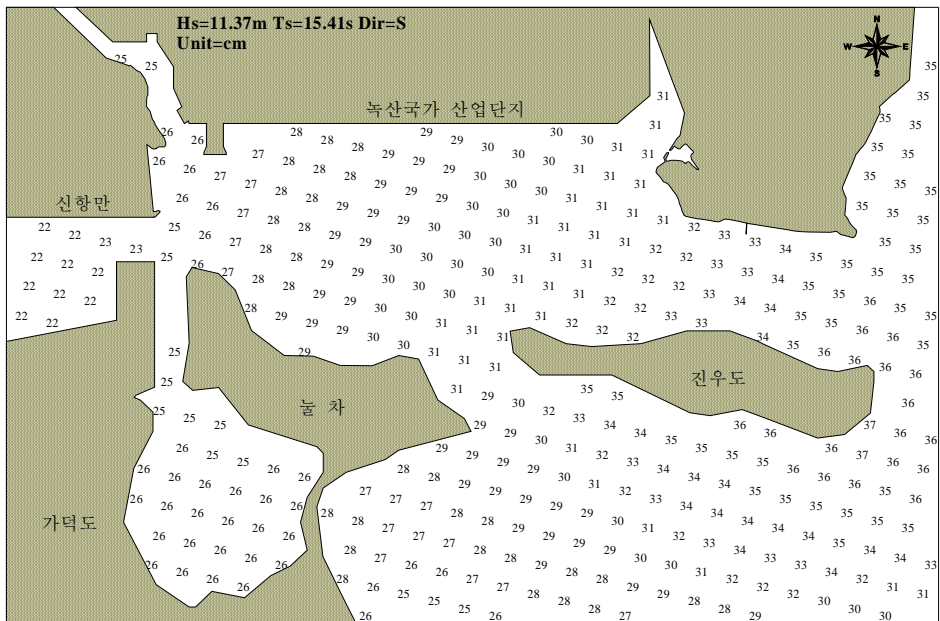


Fig. 3.17 Spatial distribution of wave-setup after construction of Busan new port.

3.2.3 설계조위 결정

월파량의 계산 혹은 그의 수리실험에서 가장 큰 변수가 되는 조위는 결과적으로 Table 3.7의 설계조위에 본 연구에서 얻어진 wave-setup에 의한 수위상승량을 고려한 조위가 최종설계조위로 되어야 한다. 따라서, Table 3.10은 월파량의 추정에서 적용되어야 하는 최대파랑(Table 3.8에서 $H_s=11.37m$, $T_s=15.41s$, $Dir=S$)의 경우에 최종설계조위를 나타낸다.

Table 3.10 The last design water level considered wave-setup.

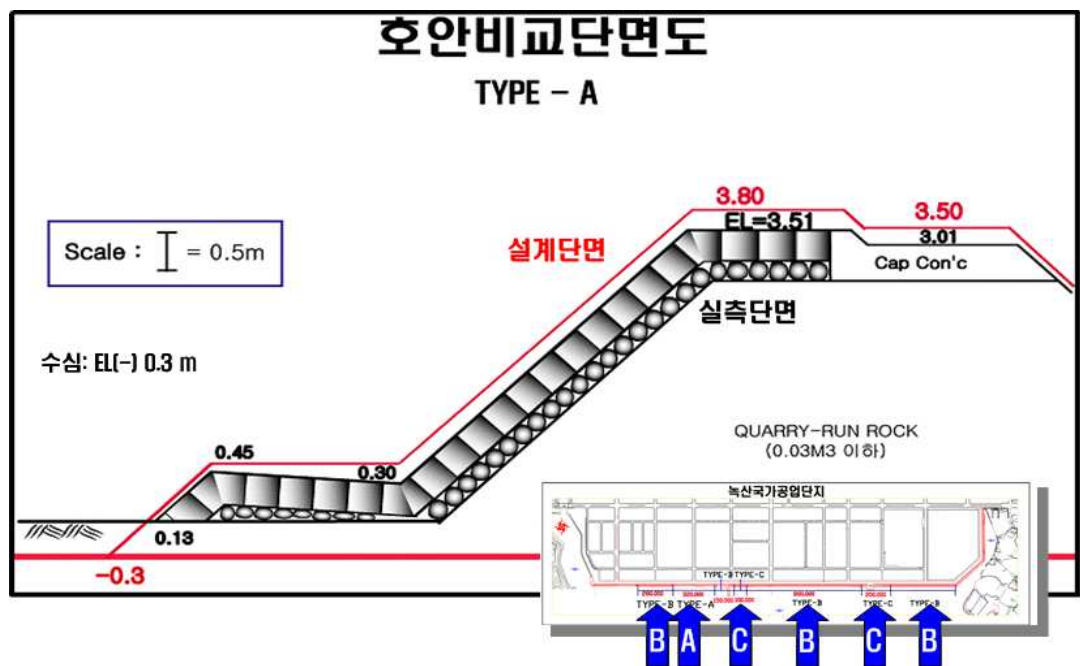
| 심해파랑 지점 | 설계조위 (m) | 심해파랑조건 | | | 최대 wave-setup량 (cm) | 최종설계조위 (m) |
|------------|--------------|----------|----------|-------|---------------------------|---------------|
| | | $H_s(m)$ | $T_s(s)$ | Dir | | |
| 073125 | D.L.(+)3.596 | 11.37 | 15.41 | S | 30 | D.L.(+)3.896 |

3.3 월파유량의 추정 및 범람해석

3.3.1 원안의 대표호안단면에서 월파유량의 추정

(1) 원안의 대표호안단면

Fig. 3.18은 월파의 수치실험을 통하여 월파상황을 검토하기 위해 제시된 녹산국가산업단지의 대표호안 단면형상을 나타내고 있다(부산광역시, 2004).



(a) Type-A

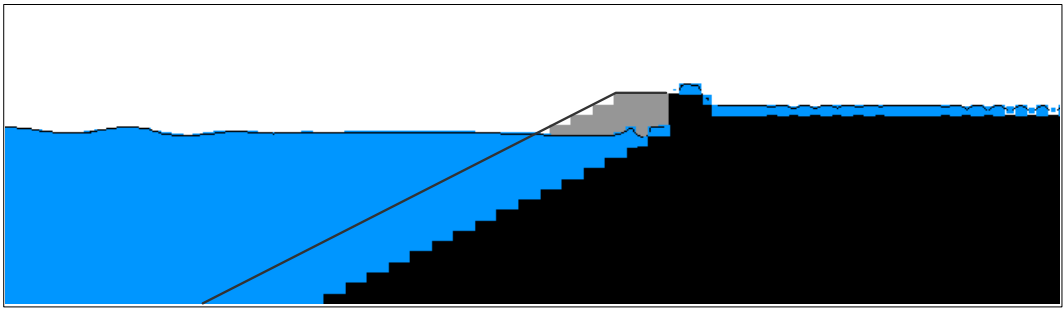
(2) 원안의 대표호안단면에서 월파재현

녹산국가산업단지 대표호안의 단면형상(Fig. 3.18 참조)에 대한 월파상황을 검토하기 위해 적용된 입사파랑조건을 Table 3.11에 나타낸다. Table 3.11의 조건은 Fig. 3.14(c)에 서와 같이 호안의 반사를 고려하지 않고 얻어진 호안전면에서 입사파랑조건이다.

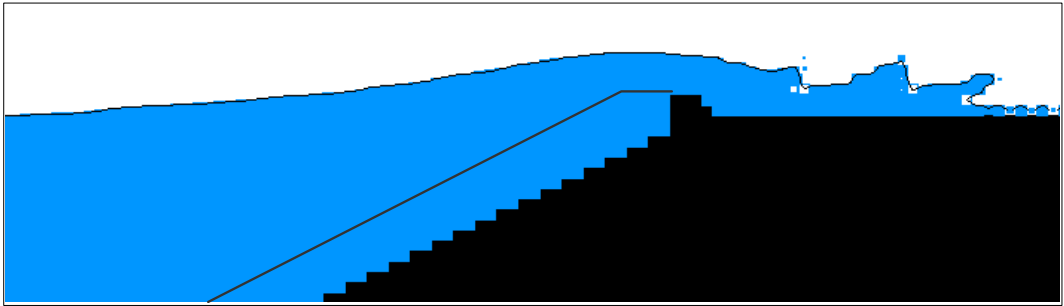
Table 3.11 Incident wave conditions.

| 단면형상 | 수심(m) | 이상고조위(기압의 영향+바람의 영향+ <i>wave-setup</i>) | $H_s(m)$ | $T_s(s)$ |
|--------|------------------------------|--|----------|----------|
| Type-A | E.L.(-)0.3m이하 | D.L.(+)3.896 | 1.46 | 15.0 |
| Type-B | E.L.(-)0.3m ~ E.L.(-)0.9m | | 1.58 | 15.0 |
| Type-C | E.L.(-)0.9m ~ E.L.(-)4.3m | | 1.49 | 15.0 |

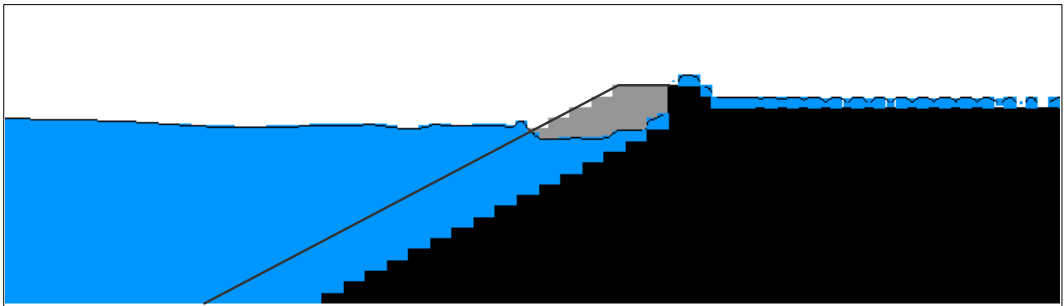
Table 3.11에서 제시된 각 파랑조건에 있어서 대표호안의 단면형상에 따른 수위변동분포를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 3.19~3.21이다. Fig. 3.19~3.21은 VOF법으로 계산하여 얻어진 월파현황의 일례를 나타내며, 파랑산정에 고려하지 않았던 TTP의 반사율은 계산상에서 공극률로 대체하여 사용하였다. (a)는 2~3번의 파가 내습한 후 임의의 시간에 대한 $t = T/4$ 시간의 상태를 나타내고, (b)는 $t = 2T/4$ 의 시간에 파가 전면호안을 월파하는 상태를 나타내고 있다. 그리고, (c)는 $t = 3T/4$ 의 시간에 파가 월파하고 난 후 파곡이 나타나는 그림이고, (d)는 $t = T$ 의 시간에 대한 상태를 나타내는 그림이다. 결과에 의하면, 월파재현실험으로부터 단면형상 Type-A, Type-B, Type-C 모두 다소 월파를 허용하는 것을 알 수 있다.



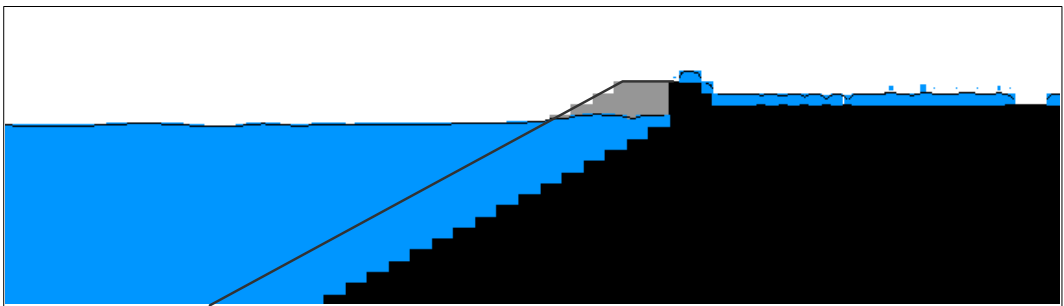
(a) $t = T/4$



(b) $t = 2T/4$

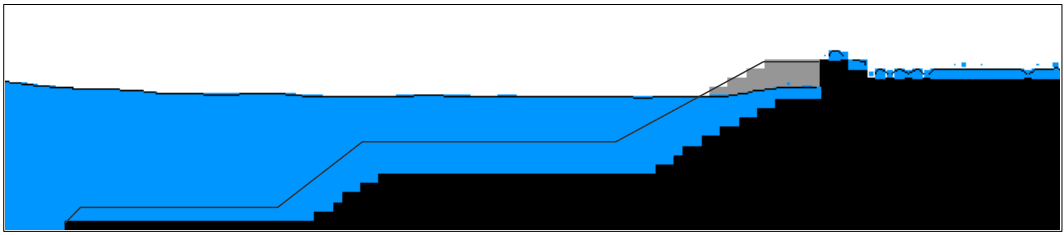


(c) $t = 3T/4$

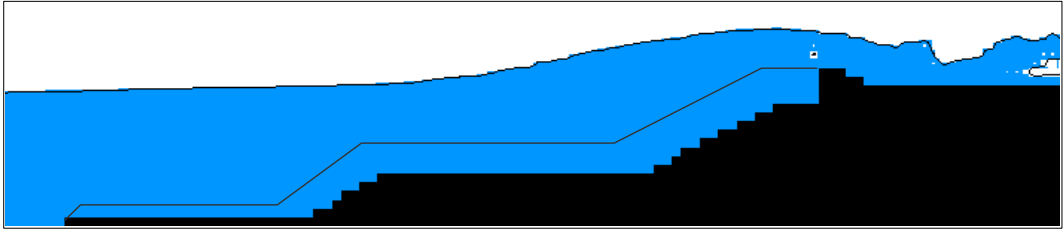


(d) $t = T$

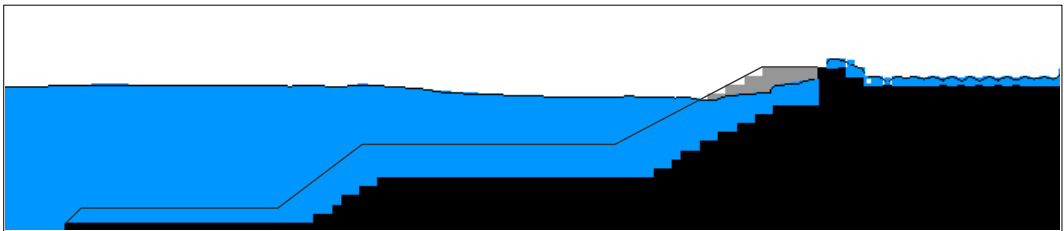
Fig. 3.19 Snapshots of wave overtopping simulation for Type-A.



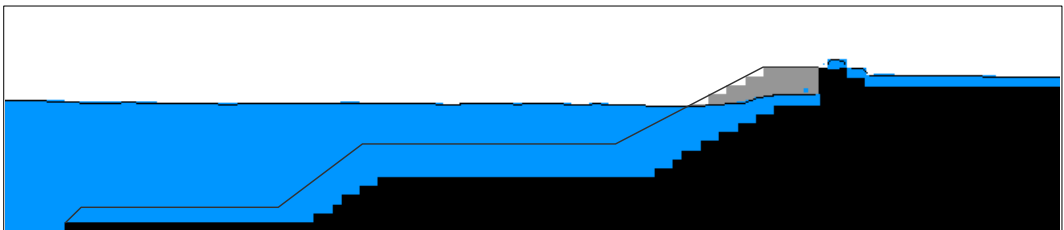
(a) $t = T/4$



(b) $t = 2T/4$

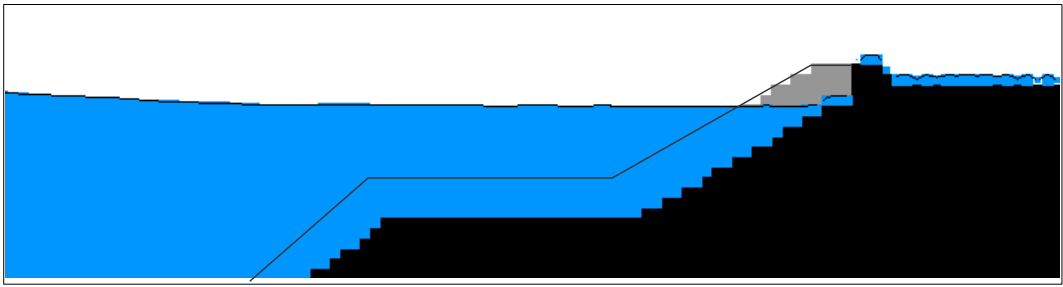


(c) $t = 3T/4$

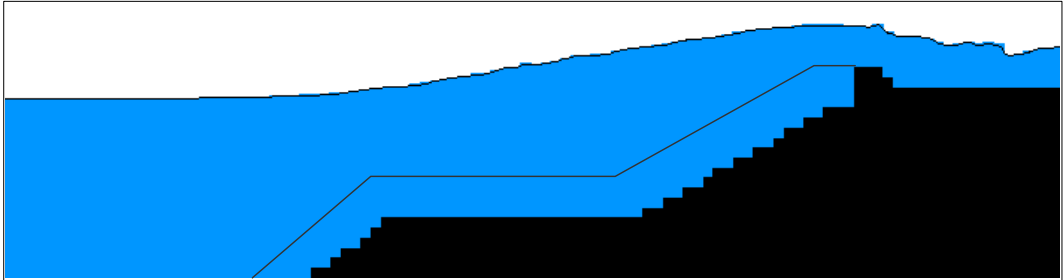


(d) $t = T$

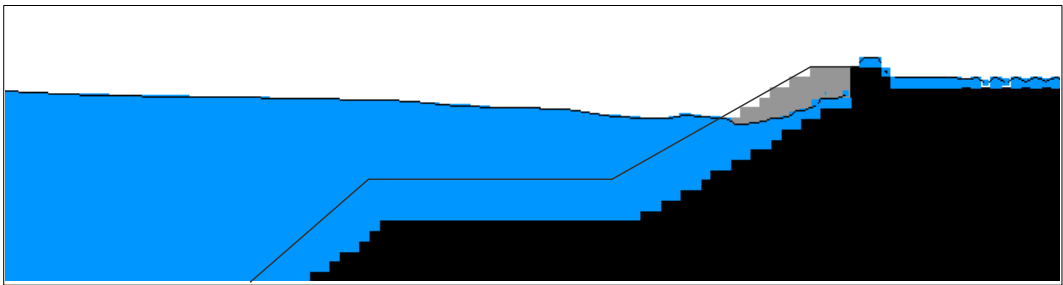
Fig. 3.20 Snapshots of wave overtopping simulation for Type-B.



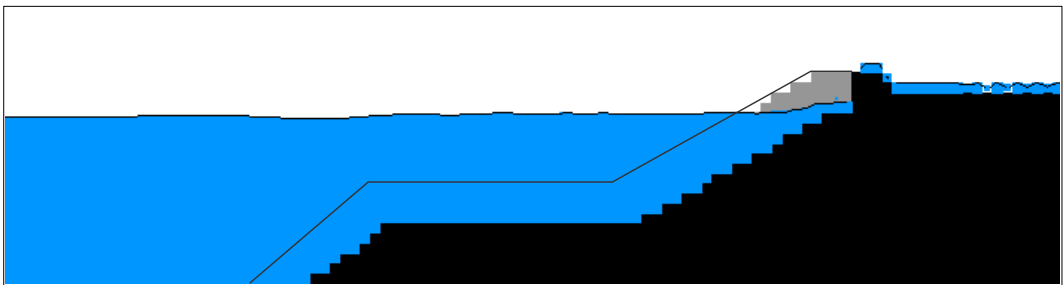
(a) $t = T/4$



(b) $t = 2T/4$



(c) $t = 3T/4$



(d) $t = T$

Fig. 3.21 Snapshots of wave overtopping simulation for Type-C.

(3) 원안의 대표호안단면에서 월파량

Table 3.11의 조건으로 재현한 월파상황에서 산정한 월파량의 결과를 Table 3.12에 나타낸다. 결과를 살펴보면 Type-A, Type-B, Type-C의 단면형상과 계산조건들은 차이가 나지만, 월파량은 $0.0173m^3/m \cdot s \sim 0.0181m^3/m \cdot s$ 로 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있으며, 이 값은 호안의 배후지가 주거지역인 경우의 허용월파량 $0.01m^3/m \cdot s$ (해양수산부, 2005)을 초과한다. 그리고, Table 3.13은 태풍 Maemi 내습시의 녹산국가산업단지 월파 및 침수에 관한 보고서(한국토지공사, 2005)에 의하면 수리모형실험으로부터 산정된 단면형상 Type-A, Type-B, Type-C의 계산조건과 월파량이다.

Table 3.12와 Table 3.13을 비교하면 수치모형실험과 수리모형실험의 결과값의 차이가 크게 나타남을 알 수 있고, 수치모형실험보다 수리모형실험으로부터 얻어진 월파량은 허용치 ($0.01m^3/m \cdot s$)를 훨씬 초과하는 것을 알 수 있다.

Table 3.12 Overtopping rates calculated by numeric analysis.

| 단면형상 | 월파량 ($m^3/m \cdot s$) |
|--------|-------------------------|
| Type-A | 0.0178 |
| Type-B | 0.0173 |
| Type-C | 0.0181 |

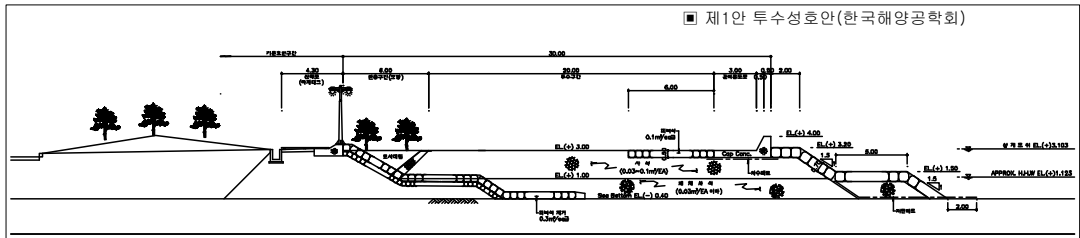
Table 3.13 Overtopping rates by hydraulic model test.

| 실험 단면 | 이상고조위 (기압의 영향+바람의 영향+Wave setup) | 천단고 (E.L.(+), m) | 파고 (m) | 주기 (s) | 월파량 ($m^3/m \cdot s$) |
|-------------------|--|---------------------|-----------|-----------|----------------------------|
| NO.2 (Type-A) | 3.646 | 3.37 | 1.41 | 15.0 | 0.059 |
| NO.11 (Type-B) | 3.646 | 3.31 | 1.47 | 15.0 | 0.063 |
| NO.20 (Type-C) | 3.646 | 3.43 | 1.55 | 15.0 | 0.113 |

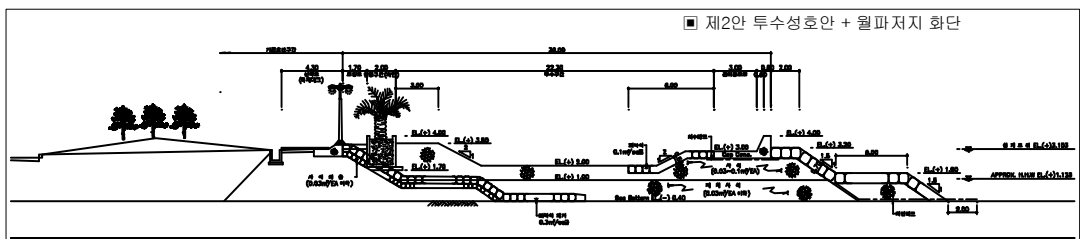
3.3.2 대안의 대표호안단면에서 월파랑의 추정

(1) 대안의 대표호안단면

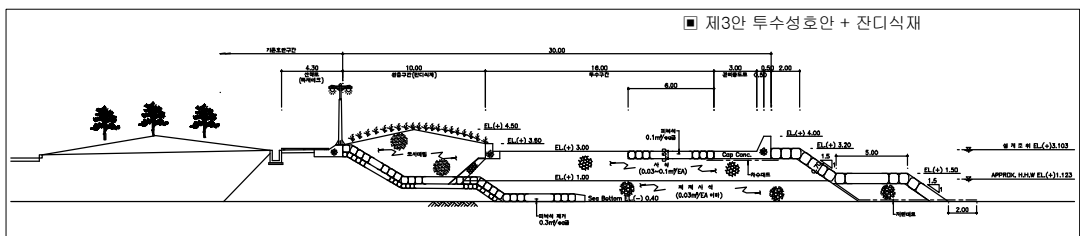
Fig. 3.22는 녹산국가산업단지 전면호안에서 월파를 저감시키기 위하여 제안된 대표호안의 단면형상을 나타내고 있다.



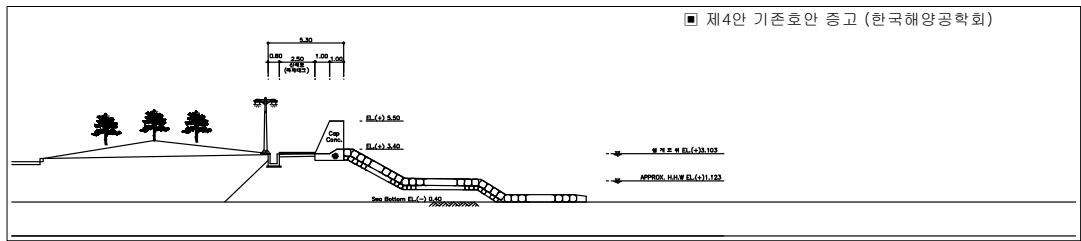
(a) Section of alternative seawall 1



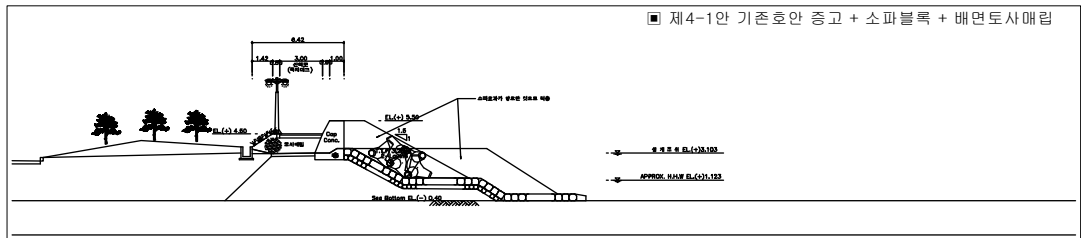
(b) Section of alternative seawall 2



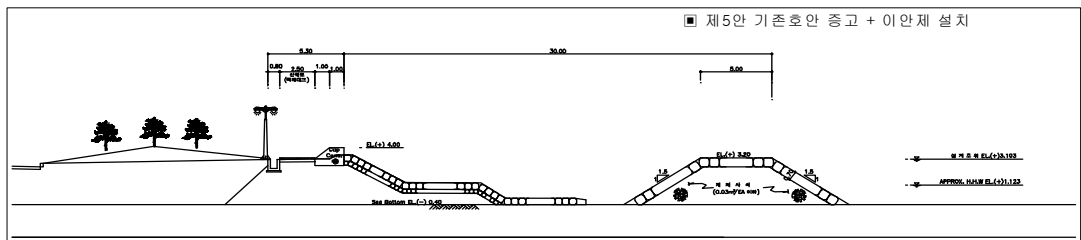
(c) Section of alternative seawall 3



(d) Section of alternative seawall 4



(e) Section of alternative seawall 4-1, 4-2



(f) Section of alternative seawall 5

Fig. 3.22 Sections of alternative seawall used in numeric simulation.

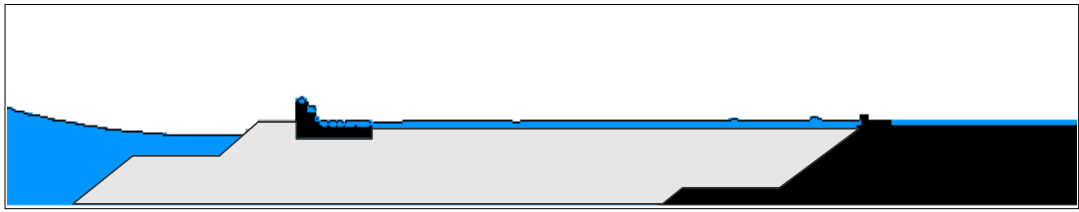
(2) 대안의 대표호안단면에서 월파재현

녹산국가산업단지 전면호안의 대안단면형상(Fig.3.22 참조)에 대한 월파상황을 검토하기 위해 적용된 입사파랑조건을 Table 3.14에 나타낸다. Table 3.14의 조건은 호안의 반사를 고려하지 않고 얻어진 호안전면에서 산정된 입사파랑조건이다.

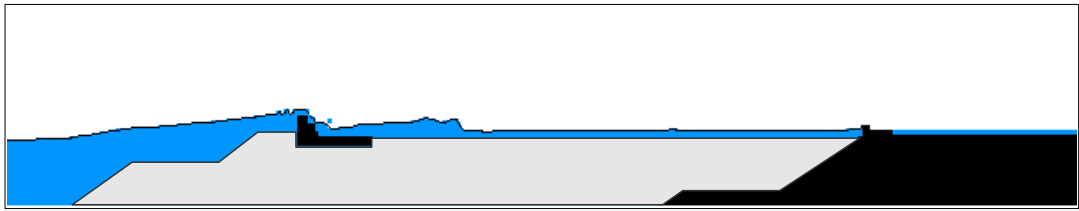
Table 3.14 Incident wave condition.

| 단면형상 | 수심(<i>m</i>) | <i>Hs(m)</i> | <i>Ts(s)</i> |
|-------|---------------------------|--------------|--------------|
| 제1안 | E.L.(-)0.3m ~ E.L.(-)0.9m | 1.53 | 15.0 |
| 제2안 | | | |
| 제3안 | | | |
| 제4안 | | | |
| 제4-1안 | | | |
| 제4-2안 | | | |
| 제5안 | | | |

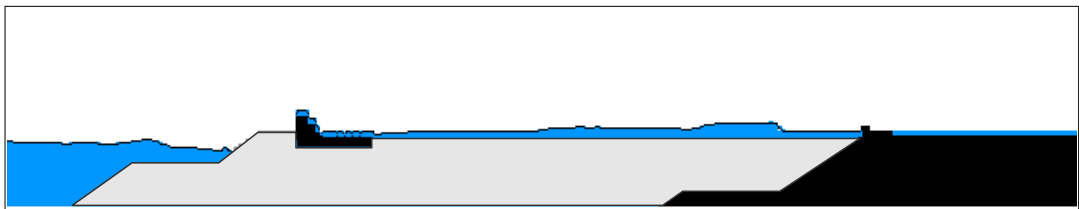
Table 3.14에서 제시된 파랑조건에 있어서 대안단면형상에 따른 수위변동분포를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 3.23에 주어져 있다. 결과에 의하면, 제4-1-1안과 제4-1-2안에 대해서는 월파가 발생하지 않음을 알 수 있으며, 다른 대안단면에 대해서는 다소 월파가 발생하는 것을 알 수 있다.



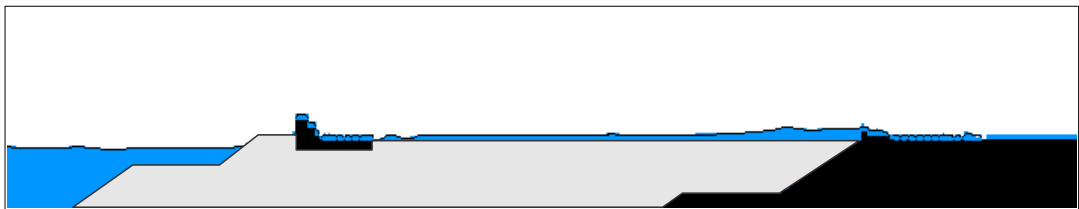
1) $t = T/4$



2) $t = 2T/4$

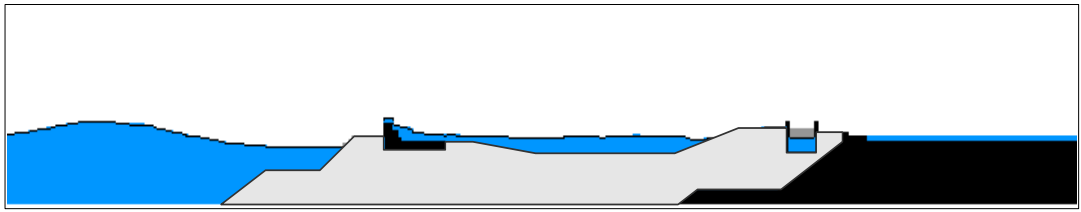


3) $t = 3T/4$

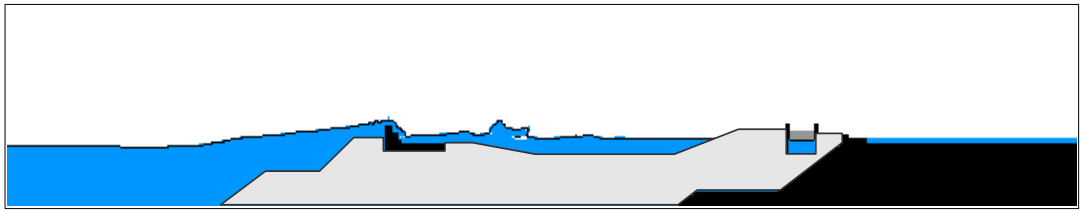


4) $t = T$

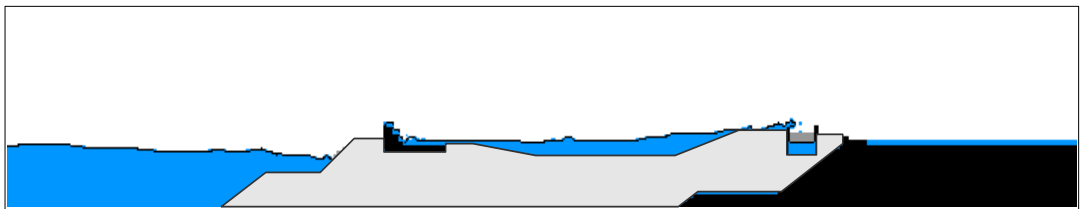
(a) Section of alternative seawall 1



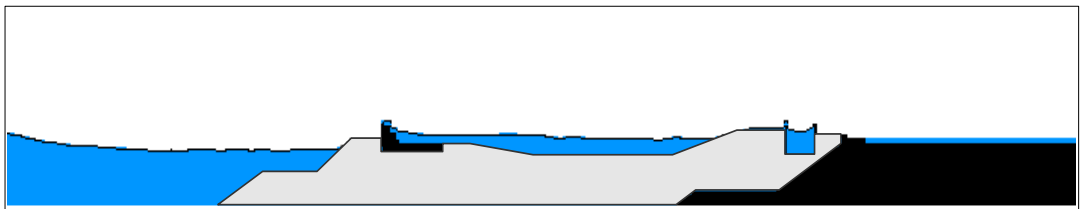
1) $t = T/4$



2) $t = 2T/4$

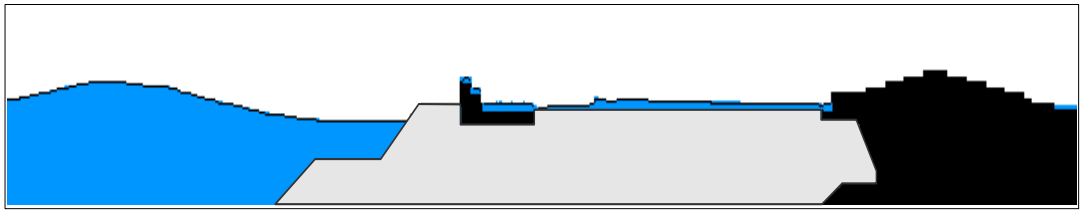


3) $t = 3T/4$

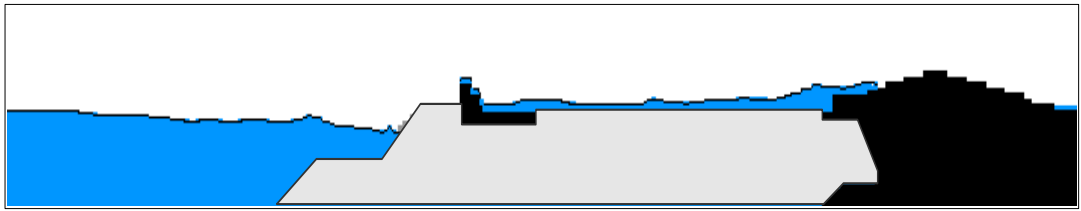


4) $t = T$

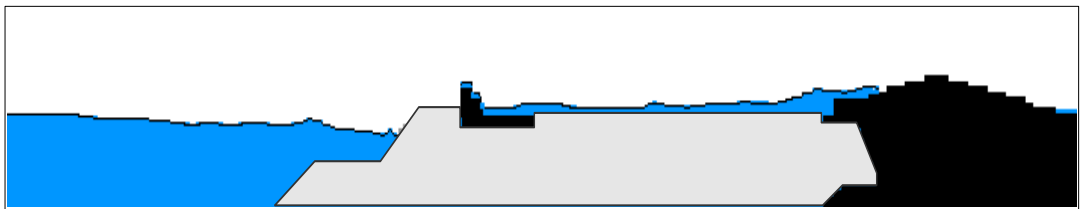
(b) Section of alternative seawall 2



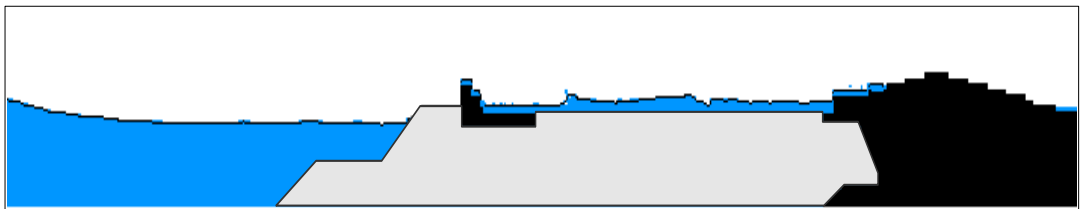
1) $t = T/4$



2) $t = 2T/4$

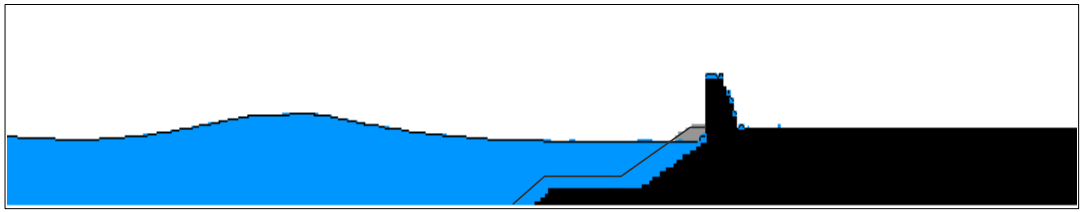


3) $t = 3T/4$

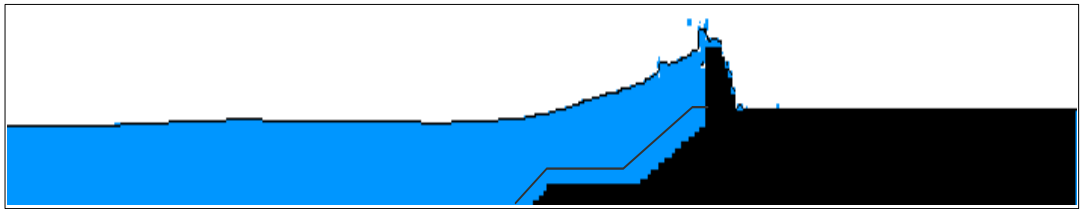


4) $t = T$

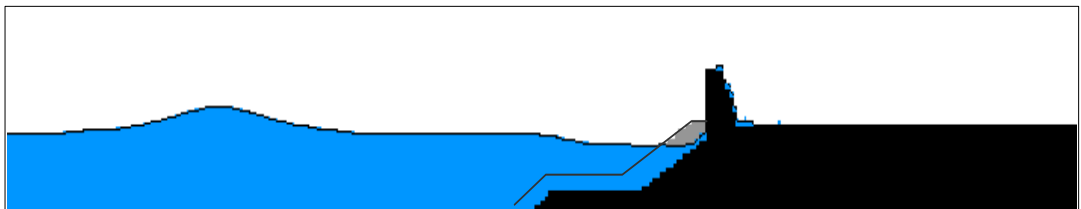
(c) Section of alternative seawall 3



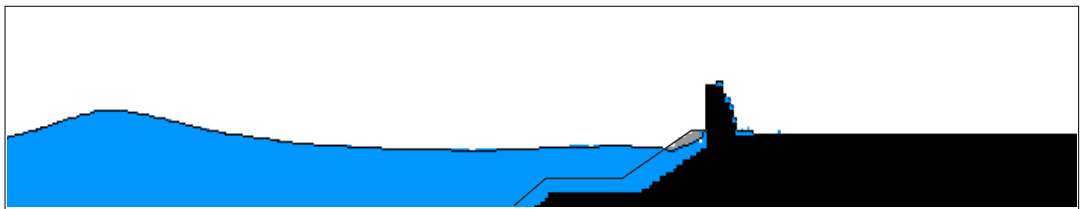
1) $t = T/4$



2) $t = 2T/4$

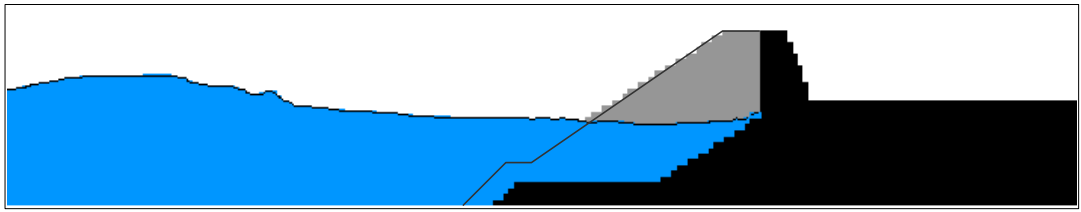


3) $t = 3T/4$

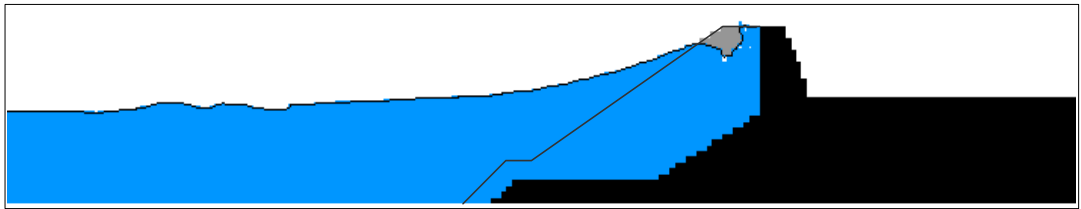


4) $t = T$

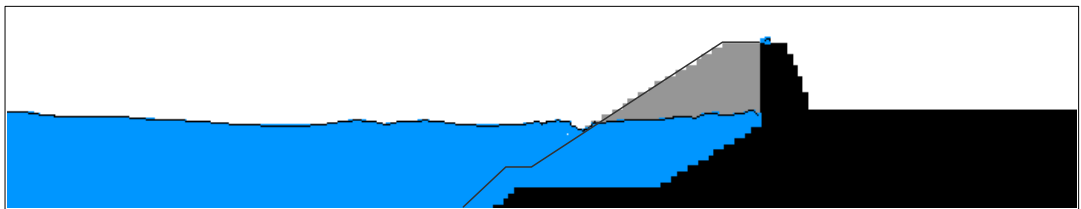
(d) Section of alternative seawall 4



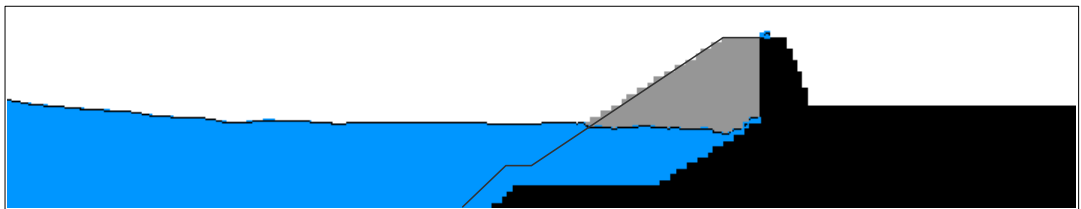
1) $t = T/4$



2) $t = 2T/4$

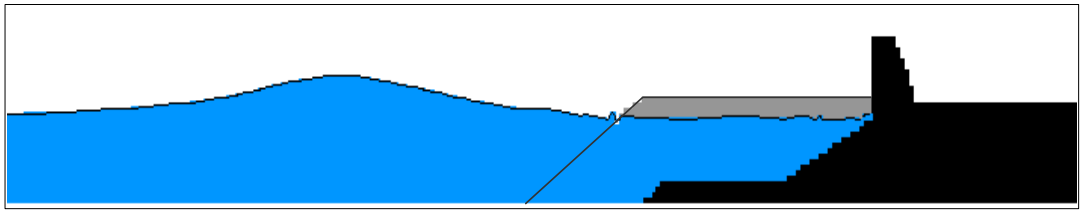


3) $t = 3T/4$

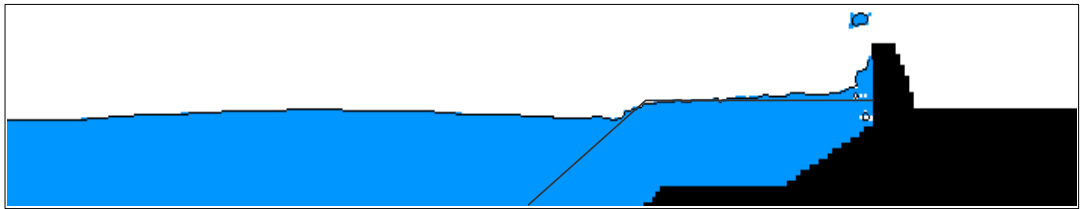


4) $t = T$

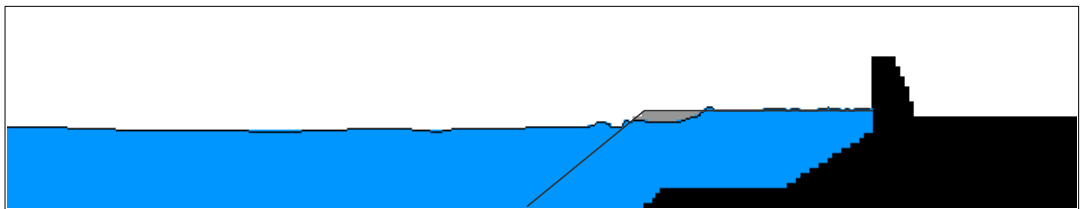
(e) Section of alternative seawall 4-1



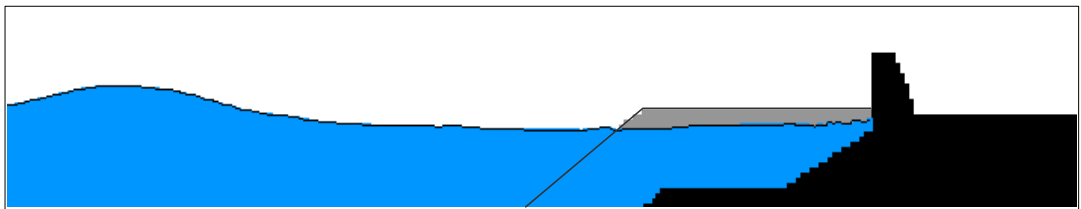
1) $t = T/4$



2) $t = 2T/4$

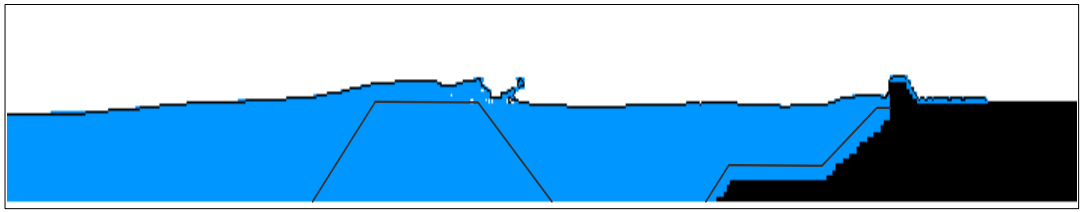


3) $t = 3T/4$

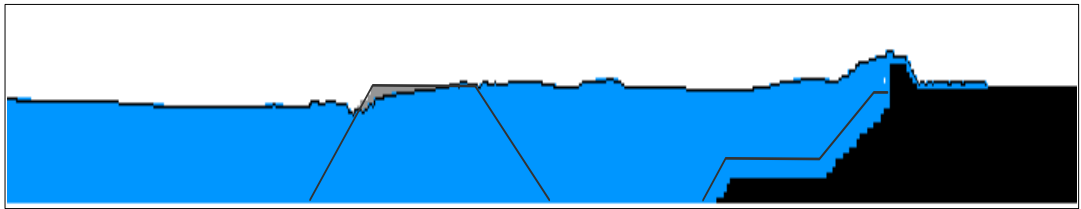


4) $t = T$

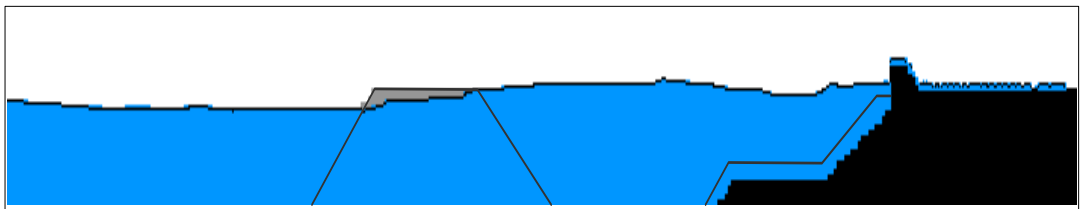
(f) Section of alternative seawall 4-2



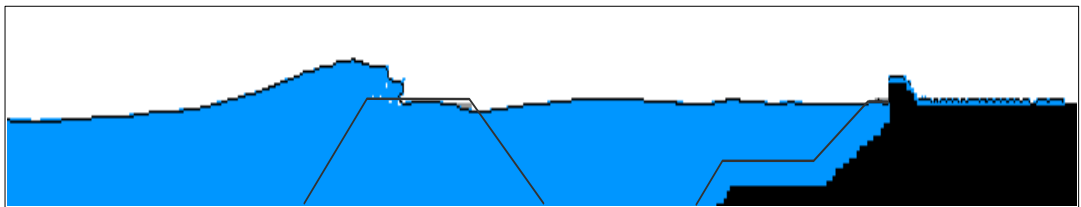
1) $t = T/4$



2) $t = 2T/4$



3) $t = 3T/4$



4) $t = T$

(g) Section of alternative seawall 5

Fig. 3.23 Snapshots of overtopping process for each alternative section.

(3) 대안의 대표호안단면에서 월파량

Table 3.14의 조건으로 재현한 월파상황에서 산정한 월파량의 결과를 Table 3.15에 나타낸다. 결과를 살펴보면 각 대안의 단면형상의 차이에 따라 월파의 유무 및 월파량의 대소의 차이가 상당히 나타난다. 제1안은 $0.0036 m^3/m \cdot s$ 의 월파량이 나타나고, 제2안은 $0.0045 m^3/m \cdot s$ 의 월파량이 나타난다. 제3안은 $0.0045 m^3/m \cdot s$ 로 제2안과 거의 동일한 유량을 산정되었다. 제4안은 $0.0019 m^3/m \cdot s$ 의 월파량이 나타나는 반면에 제4-1-1안과 제4-1-2안은 월파가 되지않는 것을 확인할 수 있었다. 제5안은 다른 5개의 대안보다는 상당히 많은 월파가 발생함을 알 수 있다. 이러한 각 대안의 월파량을 Table 3.15에 간략히 나타내며, 제1안에서 제5안까지 모든 대안이 원안과 비교해서 월파가 상대적으로 매우 적게 되는 것을 확인할 수 있다.

Table 3.15 Calculated overtopping rates for each alternative section.

| 대안 단면 | 월 파 유 무 | 월 파 량 ($m^3/m \cdot s$) |
|---------|---------|---------------------------|
| 제1안 | ○ | 0.0036 |
| 제2안 | ○ | 0.0045 |
| 제3안 | ○ | 0.0045 |
| 제4안 | ○ | 0.0019 |
| 제4-1-1안 | X | 0.0000 |
| 제4-1-2안 | X | 0.0000 |
| 제5안 | ○ | 0.0100 |

3.3.3 범람예측

(1) 월파유량의 변화에 따른 침수고의 변화

3.3.1절과 3.3.2절의 수치모형실험과 수리모형실험에서 산정된 월파량을 이용하여 녹산 국가산업단지내의 침수현상을 재현하여 월파에 의한 침수위의 변화를 검토한다. Table 3.16은 3.3.1절과 3.3.2절에서 산정된 월파량을 나타낸 것이다.

녹산국가산업단지내와 주변도로 및 건물 등을 세밀히 고려하기 위하여 격자를 x 축으로 5m, y 축으로 5m로 각각 설정하여 계산하였다. 범람모델의 수행에서 중요한 입력치인 지반고는 Land Desktop 프로그램으로 대상영역의 호안, 건물 및 도로까지 포함된 각 mesh의 지반고를 입력하였다. 또한, 계산시간은 실제 태풍내습시간에 따른 영향을 일치시키기 위하여 3시간으로 하였으며, 저면의 조도가 다르고 조도계수에 따라 범람류의 거동에 영향을 미치므로, 조도계수로 도로는 0.04(福岡, 1996), 건물은 밀도비에 따라 0.03~0.8(Miura and Shimizu, 1993)의 범위의 값을 적용하였다.

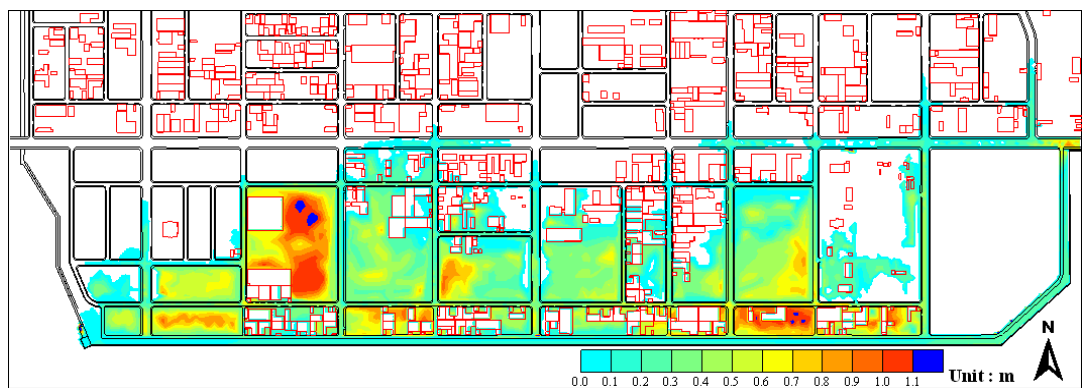
Table 3.16 Overtopping rates obtained by numerical and experimental results.

| 단면 | 수치모형에 의한 월파량 ($m^3 / m \cdot s$) | 수리모형에 의한 월파량 ($m^3 / m \cdot s$) |
|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Type-A | 0.0178 | 0.059 |
| Type-B | 0.0173 | 0.063 |
| Type-C | 0.0181 | 0.113 |

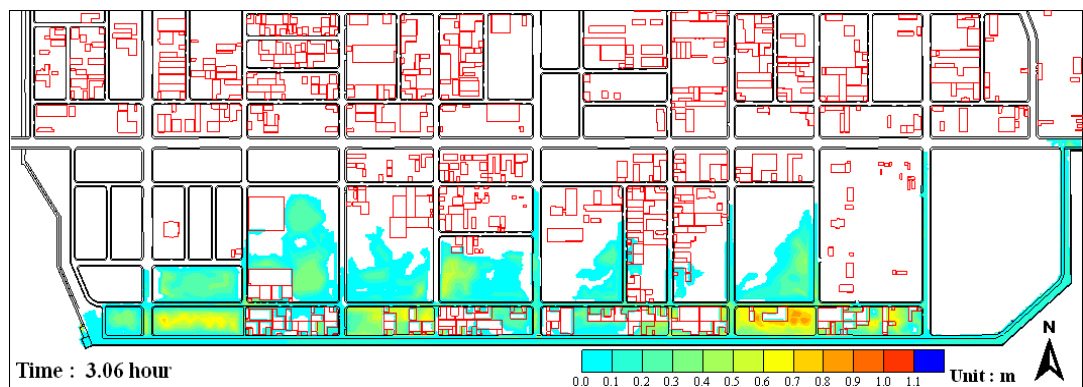
Fig. 3.24(a)는 수치모형실험에 의해 산정된 월파량을 적용하여 얻어진 해석결과를 나타낸 것이다. 호안전면의 두 블록 대부분이 침수되는 것을 알 수 있고, 전면 첫 번째 블록은 0.3m~0.8m정도 침수가, 두 번째 블록에서는 0.5m 이하의 침수고가 대부분이며 부분적으로 0.7m 이상의 침수가 발생함을 알 수 있다. 그리고, 호안전면에서 멀어질수록 0.2m이하로 감소함을 알 수 있다.

Fig. 3.24(b)는 수리모형실험에 의해 산정된 월파량을 적용하여 얻어진 해석결과를 나

타낸 것이다. 해석결과에 따르면 녹산국가산업단지내의 두 블록 대부분이 침수되는 것을 알 수 있고, 전면 첫 번째 블록은 0.7m~1.2m 정도 침수가, 두 번째 블록에서 부분적으로 0.7m 이상의 침수가 발생하지만, 호안전면에서 멀어질수록 0.3m 이하로 감소함을 알 수 있다. 수리모형실험(한국토지공사, 2005)은 단면2차원으로 수행되었기 때문에 본 결과와 직접적인 비교는 어렵지만 단면에 대해서만 비교하면 단면형상 Type-A, Type-B, Type-C에 대해서 호안으로부터 내측거리 30m 지점의 침수고는 0.77m~0.91m, 80m 지점의 침수고는 0.74m~0.89m, 130m 지점은 0.20m~0.23m로 본 연구의 결과와 경향이 매우 일치함을 알 수 있다. 이를 Table 3.17에 나타내었다.



(a) Inundation depth by experimental overtopping rates



(b) Inundation depth by numerical overtopping rates

Fig. 3.24 Spatial distributions of inundation depth in Noksan industrial complex.

Table 3.17 Comparison of inundation depths.

| 실험 단면 | 호안으로부터 내측거리(m) | 수리모형실험에 의해 산정된 침수고(m) | 수치모형실험에 의해 산정된 침수고(m) |
|-------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| NO.2 (Type-A) | 30 | 0.91 | 0.9 |
| | 80 | 0.89 | 0.7 |
| | 130 | 0.23 | 0.2 |
| NO.11 (Type-B) | 30 | 0.77 | 0.8 |
| | 80 | 0.74 | 0.7 |
| | 130 | 0.21 | 0.2 |
| NO.20 (Type-C) | 30 | 0.79 | 0.9 |
| | 80 | 0.79 | 0.8 |
| | 130 | 0.20 | 0.2 |

Fig. 3.25는 태풍 Maemi 내습후 녹산국가산업단지 인근의 설문조사에 의한 침수고(부산광역시, 2004)를 나타낸다. 결과를 살펴보면 전면의 첫 번째 블록에서 1.5m 이상의 침수고가 발생한 지역이 다수이며, 두 번째 블록에서도 1.5m 이상의 침수고가 발생하는 것을 확인할 수 있지만, Fig. 3.24와 비교하면 다소 상이한 양상을 보임을 알 수 있다.

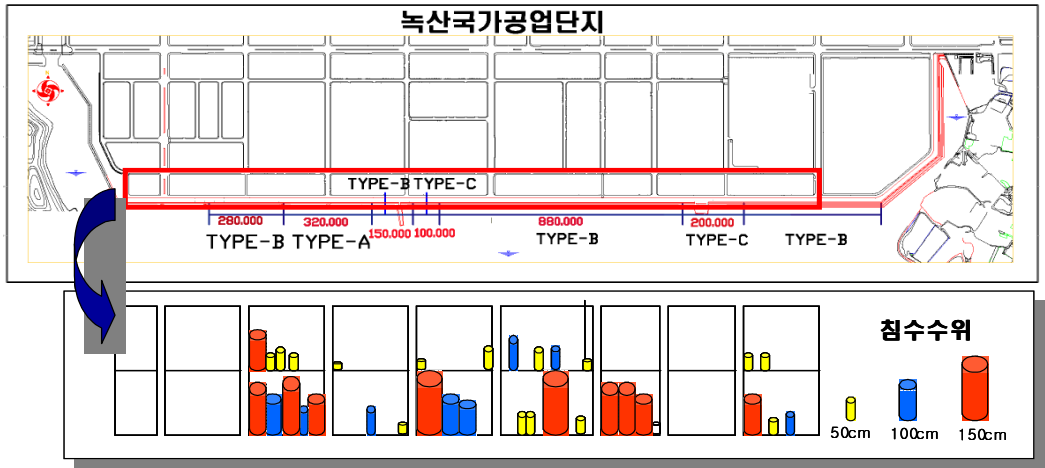


Fig. 3.25 A survey of inundation areas and depths in Noksan industrial complex.

(2) 단면의 변화에 따른 침수고의 변화

Table 3.18의 원안단면과 대안단면에 대해 추정된 월파량으로 전절과 동일하게 침수해석을 수행하였다. Table 3.18은 원안과 각각의 대안에 대해서 산정된 월파량을 나타낸 것으로, 모든 대안의 월파량이 원안의 월파량보다 현저히 적게 나타나는 것을 알 수 있으며, 제4-1-1안과 제4-1-2안에 대해서는 월파가 일어나지 않음을 알 수 있다.

Table 3.18 Comparison of overtopping rates.

| 대안 단면 | 월 파 량 ($m^3/m \cdot s$) |
|-------|---------------------------|
| 원안 | 0.0173 |
| 제1안 | 0.0036 |
| 제2안 | 0.0045 |
| 제3안 | 0.0045 |
| 제4안 | 0.0019 |
| 제4-1안 | 0.0000 |
| 제4-2안 | 0.0000 |
| 제5안 | 0.0100 |

Fig. 3.26(a)는 원안에 대해서 산정된 월파량을 적용하여 얻어진 해석결과를 나타낸 것이다. 해석결과를 살펴보면 호안전면의 두 블럭 대부분이 침수되는 것을 알 수 있고, 전면 첫 번째 블럭은 0.3m~0.8m 정도의 침수가, 두 번째 블럭에서는 0.5m 이하의 침수고가 대부분이며, 부분적으로 0.7m 이상의 침수가 발생함을 알 수 있다. 그리고, 호안전면에서 멀어질수록 0.2m 이하로 감소함을 알 수 있다.

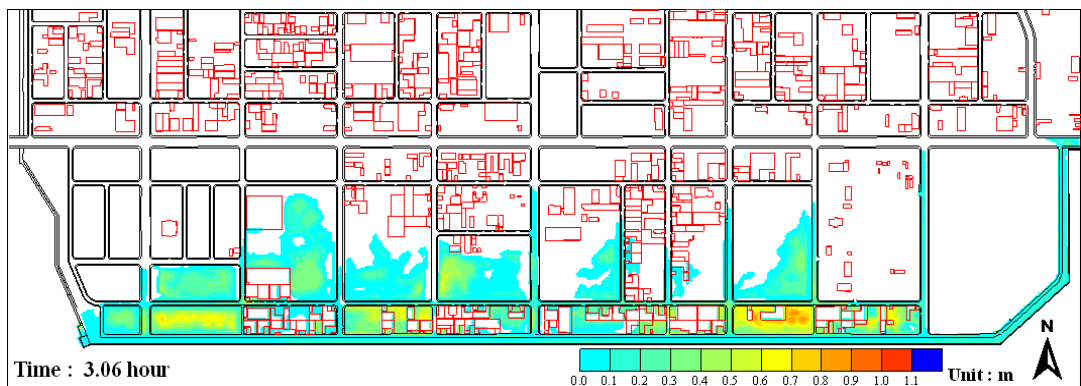
Fig. 3.26(b)는 대안중에 제1안에 대해서 산정된 월파량을 적용하여 얻어진 해석결과를 나타낸 것이다. 해석결과에 따르면 녹산국가산업단지내의 전면 두 블럭도 대부분이 침수되지 않음을 알 수 있으며, 침수고도 최고 0.4m 정도로 나타난다.

Fig. 3.26(c)는 대안중에 제2안과 제3안에 대해서 산정된 월파량을 적용하여 얻어진 해석결과를 나타낸 것이다. 제2안, 제3안은 다른 단면형상을 가지고 있으나, 월파량에서 거의 동일한 값을 나타내었기 때문에 침수해석의 결과도 동일하게 나타난 것으로 판단된다. 해석결과에 따르면 제1안과 마찬가지로 녹산국가산업단지내의 전면 두 블럭도 대

부분이 침수되지 않음을 알 수 있으며, 침수고도 최고 0.4m 정도로 나타난다.

Fig. 3.26(d)는 대안중에 제4안에 대해서 산정된 월파량을 적용하여 얻어진 해석결과를 나타낸 것이다. 제4안은 천단고의 증가로 인해 월파량이 가장 낮은 수치를 나타내었고, 이에 따라 해석결과를 보면 침수영역에 있어서는 제1안과 마찬가지로 녹산국가산업단지 내의 전면 두 블록도 대부분이 침수되지 않았고, 침수고도 최고 0.3m 정도로 나타남을 알 수 있다.

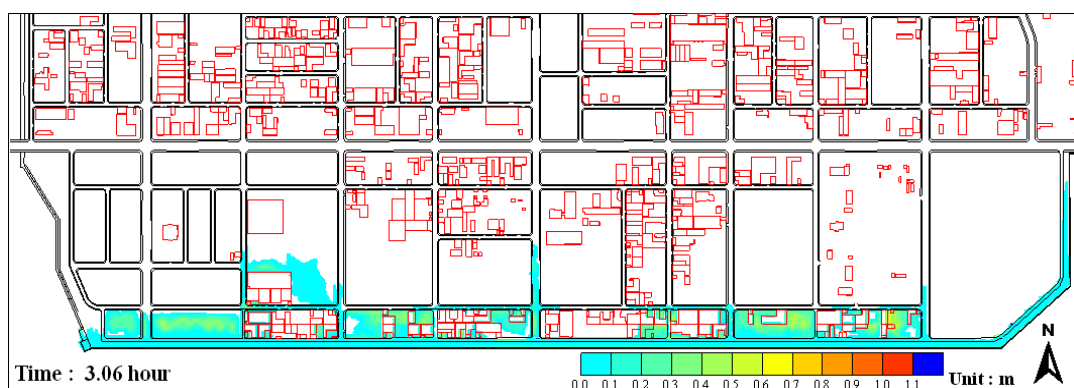
Fig. 3.26(e)는 대안중에 제5안에 대해서 산정된 월파량을 적용하여 얻어진 해석결과를 나타낸 것이다. 해석결과를 보면 침수영역에 있어서는 다른 대안과는 다르게 전면 두 블록이 모두 침수가 되었으며 그 높이도 0.8m 정도이다. 그러나, 배후 블록으로 갈수록 침수고는 감소하여 0.3m 정도로 나타남을 알 수 있다.



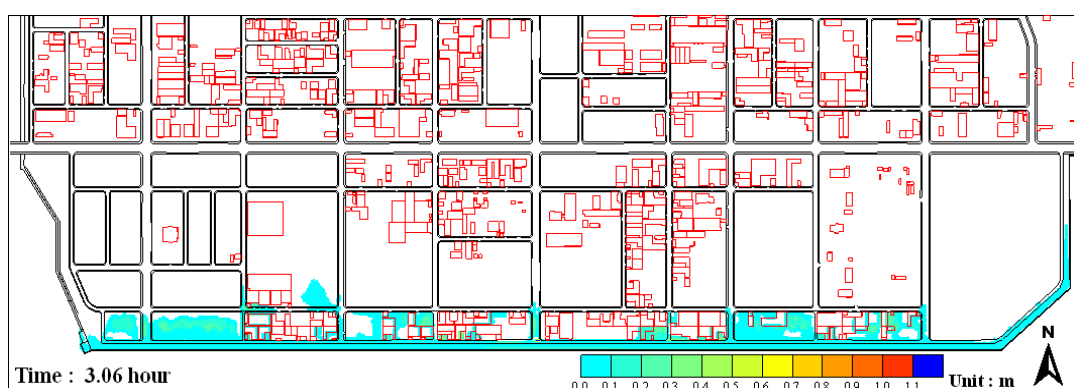
(a) Original plan



(b) Plan of alternative seawall 1



(c) Plan of alternative seawall 2, 3



(d) Plan of alternative seawall 4



(e) Plan of alternative seawall 5

Fig. 3.26 Spatial distributions of inundation depth for section of alternative seawall in Noksan industrial complex.

제4장 결 론

본 연구에서는 최근 부산연안역에 엄청난 피해를 입힌 태풍 Maemi(0314)와 이전에 인적·물적으로 큰 재해를 발생시킨 태풍 Sarah(5914)와 Thelma(8705)를 대상으로 녹산국가산업단지 인근연안에서 상세한 폭풍해일고를 추정하였고, 또한 본 해일고의 타당성을 검증하기 위하여 태풍 Maemi 통과시에 부산, 통영, 마산기상대와 검조소에서 관측된 기압 및 폭풍해일고의 시간변화와 본 연구에 의한 수치해석결과치를 각각 비교·분석하였으며, 이로부터 전반적인 좋은 대응성을 확인할 수 있었다.

또한, 정도 높은 천해설계파랑을 추정하고자 수치모델의 하나인 SWAN모델을 이용하여 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지 인근을 대상으로 불규칙 파랑에 대해서 유의파고를 추산하였다. 산정된 천해파랑을 녹산국가산업단지 전면호안에 적용하여 VOF법으로 월파랑을 산정하였다. 산정된 월파랑으로부터 월류량을 추정하고, 이로부터 제내지의 침수현상을 해석하여 대상지역 배후에 있는 도로와 공장 등의 건물을 고려하여 범람을 예측하였다. 이와 같은 과정에서 얻어진 중요한 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

4.1 폭풍해일

(1) 본 연구에서 제안하는 수치해석기법을 관측치와 비교·검토함으로써 본 연구의 타당성을 검증할 수 있었다.

(2) 과거에 내습한 태풍 Sarah, Thelma, Maemi의 수치시물레이션으로부터 부산 서부연안인 녹산국가산업단지 연안에서는 태풍 Maemi가 가장 높은 폭풍해일고를 나타내었다.

(3) 녹산국가산업단지 전면과 가덕도 사이의 협수로로 인하여 수괴의 진행이 차폐되고, 더불어 낙동강하구와 같이 만의 길이가 길고 수심이 얕은 지형적인 특성으로 조위편차가 크게 나타났다.

(4) 폭풍해일고에 대해 대상해역에 큰 영향을 미친 3개의 태풍 Sarah, Thelma, Maemi

에 대해 폭풍해일고를 추정하였으며, 동시에 신항의 완공여부가 폭풍해일고에 미치는 영향도 검토하였다. 결과에 의하면, 태풍 Maemi에 의한 해일고가 제일 큰 값을 나타내었고, 그 값은 1.69m로 주어진다. 그리고, 신항 완공여부가 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 판명된다.

(5) 보다 정도 높은 폭풍해일을 추산하기 위하여 조석, 밀도성층, 하천수의 유입 등을 고려할 필요가 있고, 이들은 향후 해결되어야 할 과제이다.

4.2 SWAN모델

(1) 태풍 Maemi 내습시 조위의 경우에 신항의 완공여부를 포함하여 6개의 심해파랑조건으로부터 대상지역의 전면해역에서 천해파랑의 파고분포 및 파향분포를 검토하였다. 결과에 의하면, 신항의 완공여부가 천해파랑의 크기변화에 미치는 영향은 해측에서 육측으로 보아 좌측호안에 미소하게 나타나지만 유의한 값의 변화로는 판단되지 않는다. 그리고, 검토된 6개의 심해설계파랑조건 모두 녹산국가산업단지의 전면해역에서 대등한 파고분포 및 파향분포를 나타내며, 대략 118~154cm의 크기분포가 나타났다.

(2) 태풍 Maemi 내습시의 조위에 대해 신항 완공여부를 포함하여 6개의 심해파랑조건으로부터 대상지역의 전면해역에서 wave-setup을 검토하였다. 결과에 의하면, 조위의 변화 및 신항의 완공여부가 wave-setup의 크기변화에 미치는 유의한 영향은 없는 것으로 판단된다. 최대의 wave-setup은 $\langle H_s=11.37m, T_s=15.41s, Dir=S \rangle$ 의 경우에 발생하며, 그 값은 30cm로 주어진다.

(3) 보다 정도 높은 유의파고의 추산을 위해서 조석 및 조류, 하천유입 등의 고려될 필요가 있으며, 이는 향후 해결되어야 할 과제이다.

4.3 월파유량의 추정 및 범람해석

(1) 월파랑의 산정 혹은 그의 수리실험에서 가장 큰 변수가 되는 조위는 쇄파에 의한

수위상승량을 고려한 조위가 최종설계조위로 되어야 하므로 월파랑의 추정에서 적용되어야 하는 최대파랑<Hs=11.37m, Ts=15.41s, Dir=S>의 경우에 wave-setup 30cm까지 고려한 최종설계조위는 태풍 Maemi 내습시의 최대폭풍해일고를 적용한 경우에 D.L.(+)3.896m로 추정된다.

(2) 연안역의 범람을 예측하기 위하여 폭풍해일-고파랑-월파-범람이라는 체계적인 결합 침수해석 기법을 사용하였다. 부산광역시 강서구 녹산국가산업단지 해역에 최대폭풍해일고를 나타낸 태풍 Maemi 내습시를 대상으로 수행된 범람해석결과는 기존의 침수사례와 비교하여 어느 정도 타당성을 갖는 것으로 판단된다. 그리고, 이의 결과를 사용하여 연안 재해의 예측, 방재계획의 수립, 위험도의 작성 등에 충분히 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 향후 건물 등의 지하로 유입되는 침수량을 고려하여 보다 정도 높은 해석을 수행하고자 한다.

〈 참고문헌 〉

- [1] 김도삼, 이광호, 2002 : 월파를 허용하는 투과성 방파제의 파랑변형에 관한 수치해석, 한국해양공학회지, 16(2), pp.1-5.
- [2] 김도삼, 이광호, 허동수, 김정관, 2001 : VOF법에 기초한 불투과잠제 주변파동장의 해석, 대한토목학회논문집, 21(5-B), pp.551-560.
- [3] 강윤구, 2005 : 태풍 매미 내습시 해일 · 고파랑에 의한 호안 · 안벽에서의 수위증가 패턴 고찰, 한국해양공학회지, 제19권, 제6호, pp 22-28.
- [4] 강윤구, 富田孝史, 김도삼, 안성모, 2004 : 태풍 매미내습시 남동연안에서의 해일 · 파랑에 의한 침수재해 특성, 한반도 해역의 고파 · 폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안 · 해양공학회, pp 35-43.
- [5] 강용균, 2004 : 태풍 ‘매미’ 통과시의 해일공명, 한반도 해역의 고파 · 폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안 · 해양공학회, pp 57-62.
- [6] 김경옥, 山下隆男, 2004 : 해파-해일 복합현상에 의한 해일고 산정, 한반도 해역의 고파 · 폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안 · 해양공학회, pp 81-86.
- [7] 부산광역시, 2004 : 녹산공단 해일피해 방재대책 수립용역 보고서.
- [8] 이종섭, 주귀홍, 장선덕, 1990 : 부산 연안 폭풍해일의 변동양상과 수치예측, 한국해안 · 해양공학회 논문집, 제2권, 제2호, pp 104-111.
- [9] 최병호, 2004 : 태풍 매미호에 의한 해안 재해, 한반도 해역의 고파 · 폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안 · 해양공학회, pp 1-34.

- [10] 최병호, 엄현민, 김현승, 정원무, 심재설, 2004 : Wave-Tide-Surge Coupled Simulation for Typhoon Maemi, 한반도 해역의 고파 · 폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안 · 해양공학회, pp 121-144.
- [11] 한국토지공사, 2005 : 녹산산단 태풍 매미 피해원인 분석용역 보고서.
- [12] 한국해양연구원, 2005 : 전해역 심해설계과 추정 보고서II.
- [13] 해양수산부, 2005 : 항만 및 어항설계기준.
- [14] 허동수, 염경선, 김지민, 김도삼, 배기성, 2006a : 부산연안에서 폭풍해일고의 추정, 한국해양공학회지 제20권, 제3호, pp 37-45.
- [15] 허동수, 염경선, 김지민, 김도삼, 배기성, 2006b : 경남연안의 지역특성에 따른 폭풍해일고의 변동, 한국해양공학회지 제20권, 제3호, pp 45-53.
- [16] Atsuyoshi Miura and Yasuyuki Shimizu, 1993 : Flood flow analysis in urban areas, International Conference on Environmentally Sound Water Resources Utilization Bangkok, Thailand.
- [17] Goda, Y, 1985 : Random Seas and Design of Maritime Structures, University of Tokyo Press.
- [18] Hasselmann, K., and T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P.Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973 : Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project(JONSWAP), Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl., 12, A8.
- [19] Hirt, C.W., and B.D. Nichols, 1981 : Volume of fluid(VOF) method for the

dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys., 39, pp.201-225.

- [20] Kawai, H., Kim, D.S., Kang, Y.K., Tomita, T. and Hiraishi, T., 2005a : Hindcasting of Storm Surge at Southeast Coast by Typhoon Maemi, 한국해양공학회지, 제19권, 제2호, pp 12-18.
- [21] Kawai, H., Kim, D.S., Kang, Y.K., Tomita, T. and Hiraishi, T., 2005b : Hindcasting of Storm Surges in Korea by Typhoon 0314(Maemi)", Proceeding of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, pp 446-453.
- [22] Makoto Takeda, Pokharel Parameshor and Naoki Matsuo, 2005 : The Study on overlapping between flood and storm surge in river and estuary region, 한국수자원학회 학술대회지, pp.868~867.
- [23] McDonald, A. and D. Ledger, 1981 : Flood Area Modeling from an Elementary Data Base, Journal of Hydrology, Vol.53, pp85-94.
- [24] Mitsuyasu, H. and Kusaba, T., 1984 : Drag Coefficient over Water Surface under the Action of Strong Wind, Journal of Natural Disaster Science, Vol.6, No.2, pp 43-50.
- [25] Myers, V.A. and Malkin, W., 1961 : Some Properties of Hurricane Wind Fields as Deduced from Trajectories, U.S. Weather Bureau, National Hurricane Research Project, Report 49.
- [26] Petit, H. A. H., Tonjes, P., van Gent, M. R. A., and van den Bosch, P., 1994 : Numerical simulation and validation of plunging breakers using a 2D Navier-Stokes model, Proc. 23rd Int. Conference on Coastal Eng., ASCE, pp. 511-524.

- [27] Van Gent, M. R. A., Tonges, H. A. H., and van den Bosch, 1994 : Wave action on and in permeable structure, Proc. 23rd Int. Conference on Coastal Eng., ASCE, pp. 1739-1753.
- [28] Xanthopoulos, Th. and Ch. Koutitas, 1976 : Numerical Simulation of a Two Dimensional Flood Wave Propagation Due to Dam Failure, Jour. Hydraulic Research, Vol.14, No.2, pp.321-330.
- [29] 岩田好一朗, 川崎浩司, 金度三, 1994 : 水中構造物による碎波の数値解析, 海岸工学論文集, 42, pp.781-785.
- [30] 許東秀, 2000 : 潛堤による多方向不規則波の碎波特性と潛堤上の構造物に作用する波力特性に関する基礎的研究, 名古屋大學學位論文, 177p.
- [31] 沿岸開發技術研究センタ, 2001 : CADMAS-SURF 數值波動修路の開發・研究, pp.10-29
- [32] 武田 誠, 1996 : 高潮の氾濫解析法とその都市域への応用に關する研究, 京都大學博士學位論文.
- [33] 福岡捷二, 川島幹雄, 松氷宣夫, 前内氷敏, 1994 : 密集市街地の氾濫流に關する研究, 土木學會論文集, No.491/II-27, pp.51-60.
- [34] 井上和也, 1986 : 開水路非正常流の数値解析法とその水工学への応用に關する研究, 京都大學學位論文, pp.172-177.